

ЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.314

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15

КОРРЕКЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МНОГОФАЗНЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Егоров Д.Э.¹, Довгун В.П.¹, Боярская Н.П.², Ян А.В.¹, Слюсарев А.С.¹.

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Многофазные (многопульсные) выпрямители являются одной из основных нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий. Преимуществом многофазных схем является меньший уровень низкочастотных гармоник тока на стороне переменного напряжения. В реальных условиях токи многофазных выпрямителей имеют широкий спектр, включающий как характеристические, так и нехарактеристические гармоники. Это отрицательно сказывается на качестве электроэнергии. МЕТОДЫ. Традиционным средством компенсации реактивной мощности в сетях промышленных потребителей являются конденсаторные установки. Однако включение конденсаторов приводит к образованию параллельных резонансных контуров с индуктивностью сети. Это может вызвать резонансное усиление отдельных гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены устройства параллельной емкостной компенсации для систем электроснабжения, питающих многофазные нелинейные нагрузки, в форме параллельного соединения широкополосных пассивных фильтров лестничной структуры. Они обеспечивают не только компенсацию реактивной мощности, но и коррекцию частотных характеристик сети для демпфирования резонансных режимов. Рассмотрен аналитический метод расчета предложенных широкополосных фильтров, основанный на денормировании фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности. Метод позволяет варьировать уровень ослабления отдельных гармоник, передаваемых во внешнюю сеть, за счет распределения мощности компенсирующего устройства между звеньями. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Сравнительный анализ различных конфигураций показал, что предложенные ФКУ на основе широкополосных фильтров позволяют компенсировать реактивную мощность на частоте основной гармоники, а также снизить уровень гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками, до значений, определяемых ГОСТ 32144-2013. Предложенные в статье фильтры обеспечивают эффективное подавление как характеристических, так и нехарактеристических гармонических составляющих, а также имеют меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными решениями.

Ключевые слова: коэффициент мощности, гармоники, многопульсные нелинейные нагрузки, широкополосные пассивные фильтры.

Для цитирования: Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

POWER FACTOR CORRECTION IN POWER DELIVERY SYSTEMS WITH MULTIPULSE NONLINEAR LOADS

DE. Egorov¹, VP. Dovgun¹, NP. Boyarskaya², Jan AW¹, AS. Slyusarev¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* Multipulse rectifiers are widely used as a nonlinear loads in industrial distribution systems. The advantage of multipulse rectifiers is low harmonic emission and high power factor. However input currents of multipulse rectifiers have a wide spectrum including characteristic and noncharacteristic harmonics. This has a negative impact on the power quality. Shunt capacitors are the simplest form of reactive power compensation in industrial power distribution systems. However power systems with nonlinear loads suffer from severe harmonic distortion due to the parallel resonance between capacitors and system inductance. Special compensating devices for reactive power compensation and correction of power system frequency response for resonances damping are necessary. *METHODS.* In this paper shunt compensating devices for power delivery systems with multipulse nonlinear loads are considered. Proposed devices are composed of 3-5 order parallel connected passive broadband filters. They provide power factor correction, voltage and current harmonics mitigation and resonance modes damping. A general broadband filter design procedure based on frequency and reactive power scaling of normalized filter parameters is developed. *RESULTS.* Characteristics of different compensating devices configurations using broadband passive filters are discussed. It is shown that broadband filtering devices enable compensation of fundamental frequency reactive power as well as mitigation of voltage harmonic level to values determined by Russian and international standards. Proposed devices have lower fundamental power losses in comparing with known solutions. *CONCLUSION.* Proposed analytical design method is applicable to broadband filters of different orders.

Keywords: power factor, harmonics, multipulse nonlinear loads, broadband passive filters

For citation: Egorov DE, Dovgun VP, Boyarskaya NP, Jan AW, Slyusarev AS. Power factor correction in power delivery systems with multipulse nonlinear loads. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

Введение и литературный обзор

Во многих системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий наблюдаются значительные отклонения показателей качества электроэнергии (КЭ) от требований ГОСТ 32144-2013. Несоответствие показателей КЭ требованиям стандартов приводит к снижению энергетических показателей, технологическим нарушениям, ухудшению функционирования оборудования как у конечных потребителей, так и в СЭС в целом [1, 2].

В отличие от сетей низкого напряжения, в которых преобладают маломощные однофазные нелинейные приемники, в сетях промышленных потребителей, таких как металлургические или нефтехимические предприятия, основным источником искажений являются крупные нелинейные нагрузки. Значительную часть нагрузок промышленных предприятий составляют многофазные (многопульсные) выпрямители, имеющие большую индуктивность со стороны выпрямленного напряжения.

Схемы многофазных выпрямителей строятся на основе последовательного или параллельного соединения трехфазных мостовых схем. На стороне переменного напряжения такой выпрямитель ведет себя как источник гармоник тока. Преимущества многофазных схем – повышенный коэффициент мощности и относительно малый уровень низкочастотных гармоник токов на стороне переменного напряжения [3, 4]. В идеальных условиях такие выпрямители являются источниками гармоник с порядковыми номерами

$$n = kp \pm 1,$$

где p – пульсность выпрямителя; $k = 1, 2, 3, \dots$

Гармоники с порядковыми номерами, определяемыми выражением (1), называют характеристическими [5-7] или каноническими [1]. В реальных условиях спектры входных токов многофазных выпрямителей содержат и нехарактеристические (неканонические) гармоники, порядковые номера которых не соответствуют формуле (1), а также интергармоники с частотами, некратными основной частоте. Нехарактеристические гармоники могут возникать вследствие разброса параметров отдельных выпрямителей, составляющих многопульсную схему, или несимметрии напряжений сети [1,5-7].

Распространенным средством компенсации реактивной мощности в сетях промышленных потребителей являются конденсаторные установки (КУ). Однако включение батарей конденсаторов приводит к образованию параллельных резонансных контуров с сетью, сопротивление которой имеет индуктивный характер. Поэтому использование КУ для повышения коэффициента мощности в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками может привести к резонансному усилению отдельных гармоник. Искажение формы напряжений и токов отрицательно влияет на работоспособность КУ. Потери энергии в конденсаторах пропорциональны частоте. Поэтому высокочастотные гармоники в сетевом напряжении вызывают перегрузку и повреждение конденсаторов.

Значительное искажение напряжений в сетях электроснабжения промышленных потребителей отмечают многие авторы [1,2,5,6-9]. Анализ качества электроэнергии в системе электроснабжения алюминиевого завода, проведенный в статье [6], показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения значительно превышает пределы, установленные стандартами МЭК 61000-2-4 и МЭК 61000-3-6. Аналогичная ситуация характерна и для систем электроснабжения отечественных предприятий цветной металлургии. Результаты исследований качества электроэнергии, приведённые в [2], показали, что в электрических сетях 10–500 кВ показатели КЭ, характеризующие искажения напряжения, не соответствуют нормам, определяемым ГОСТ 32144-2013.

Искажения синусоидальной формы токов и напряжений уменьшают коэффициент мощности сети. При несинусоидальных режимах современные стандарты рекомендуют определять коэффициент мощности по формуле

$$\lambda = \cos \phi_1 \frac{1}{\sqrt{1+k_I^2}}.$$

где ϕ_1 – угол сдвига фаз между гармониками напряжения и тока основной частоты; k_I – суммарный коэффициент гармоник тока.

Таким образом, проблемы коррекции коэффициента мощности и компенсации гармонических искажений в системах электроснабжения промышленных предприятий имеют тесную связь. Применение традиционных устройств поперечной емкостной компенсации в сетях с мощными нелинейными потребителями может оказаться неэффективным. В этом случае необходима установка специальных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), обеспечивающих не только компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники, но и подавление высших гармоник, а также коррекцию частотных характеристик сети для демпфирования резонансных режимов.

Как правило, в качестве пассивных ФКУ используют узкополосные фильтры в форме последовательных резонансных контуров, настроенных на частоты наиболее мощных канонических гармоник. Высокодобротные узкополосные фильтры образуют параллельные резонансные контуры с индуктивностью сети. Это может вызвать усиление неканонических или интергармоник, если их частоты близки или совпадают с частотами параллельных резонансов. Поэтому для систем электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками необходимы ФКУ, обеспечивающие коррекцию частотных характеристик СЭС в диапазоне, включающем частоты как характеристических, так и нехарактеристических гармоник.

Компенсирующие устройства на основе широкополосных фильтров (ШПФ), обеспечивающие ослабление отдельных гармоник, а также коррекцию частотных характеристик системы электроснабжения, рассмотрены в работах [6-14]. Примеры расчета, приведенные в [6,9,10,14], показывают эффективность применения широкополосных

пассивных фильтров для коррекции коэффициента мощности и ослабления уровня гармоник напряжений и токов в сетях с многофазными преобразователями. Недостатком простейших пассивных ШПФ второго-третьего порядков, рассмотренных в [6, 14], является невысокая селективность, а также значительные потери мощности.

Процедура синтеза широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка предложена в [15,16]. С ее помощью определены параметры ФКУ для компенсации реактивной мощности и ослабления искажений напряжения в системах электроснабжения, основной нагрузкой которых являются трехфазные преобразователи. Примеры, приведенные в [15,16], показывают, что синтезированные широкополосные ФКУ могут быть использованы и для коррекции коэффициента мощности в сетях с многопульсными нелинейными нагрузками. Однако для этого необходимо рассмотреть вопросы, связанные с выбором конфигураций и мощности отдельных звеньев.

В настоящей статье рассмотрены устройства параллельной емкостной компенсации для систем электроснабжения с нелинейными многофазными нагрузками в форме параллельного соединения широкополосных звеньев 3-5 порядка. Такие устройства обеспечивают коррекцию коэффициента мощности, ослабление искажений токов и напряжений, коррекцию частотных характеристик системы «пассивный фильтр – внешняя сеть». Предложена простая процедура расчета широкополосных фильтров, основанная на денормировании фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности. В процессе расчета мощность компенсирующего устройства распределяется между звеньями таким образом, чтобы минимизировать уровень характеристических и нехарактеристических гармоник, передаваемых во внешнюю сеть. Проведен сравнительный анализ различных устройств поперечной емкостной компенсации на основе пассивных широкополосных фильтров.

Рассмотрим основные конфигурации широкополосных фильтров, используемых для коррекции коэффициента мощности в системах с многофазными нагрузками.

Простейший широкополосный фильтр второго порядка показан на рис. 1. Компенсирующие устройства, образованные параллельным соединением широкополосных звеньев второго порядка, использованы в [6, 14] для коррекции коэффициента мощности в системах электроснабжения металлургических предприятий и мощных приводов с регулируемой скоростью вращения.

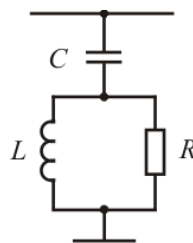


Рис. 1. Широкополосный фильтр второго порядка

Реактивная мощность фильтра второго порядка:

$$Q = 2\pi f_1 C U^2 \quad (1)$$

Частоту настройки принимают равной:

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Добротность фильтра:

$$Q_f = \frac{R}{\sqrt{L/C}}. \quad (3)$$

В последних выражениях f_1 – частота основной гармоники, f_n – частота гармоники, на которую настроен фильтр. Формулы (1-3) могут быть использованы для расчета ШПФ на рис. 1.

Для широкополосных фильтров второго порядка характерны большие потери мощности в демпфирующем резисторе. Для снижения потерь на частоте основной гармоники в фильтре С-типа (рис. 2) параллельно демпфирующему резистору включен резонансный контур LC_2 , настроенный на частоту основной гармоники. Теоретически такой фильтр имеет нулевые потери в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники, если контур LC_2 настроен в резонанс на эту частоту. Однако при этом емкость конденсатора C_2 должна значительно превышать емкость конденсатора C_1 , определяющего реактивную мощность фильтра. Поэтому суммарная емкость фильтра С-типа равна $n^2 C_1$, где n – порядковый номер гармоники, на которую настроен фильтр.

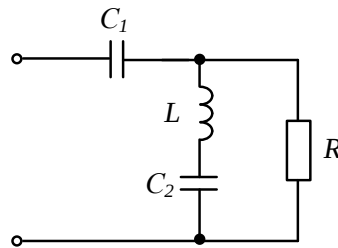


Рис. 2. Фильтр С-типа

Другой механизм уменьшения потерь на частоте основной гармоники использован в широкополосном фильтре третьего порядка (рис. 3). В этой схеме конденсатор C_2 включен последовательно с демпфирующим резистором R . Анализ, проведенный в [10], показал, что компенсационные характеристики фильтра С-типа и ШПФ третьего порядка примерно одинаковы. Однако аналитические методы расчета фильтров третьего порядка, рассмотренные в [6,10,12,14], очень громоздки и позволяют проектировать лишь частные случаи ШПФ.

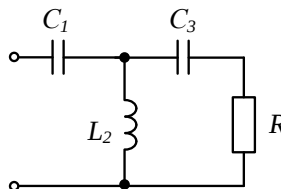


Рис. 3. Широкополосный фильтр третьего порядка

Методы расчета широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка, основанные на использовании теории синтеза пассивных цепей, рассмотрены в [13, 15, 16]. В качестве базовой структуры предложено использовать односторонне нагруженный лестничный LC - четырехполюсник (рис. 4). В статье [13] предложен метод расчета ШПФ произвольного порядка, основанный на денормировании характеристик пассивных фильтров, реализующих типовую передаточную функцию Баттерворта. Такой метод расчета позволяет получить ФКУ, имеющие монотонную частотную характеристику в полосе ослабления. Однако для получения эффективного решения необходимо учитывать относительный уровень гармоник тока нелинейной нагрузки, а также частотные характеристики сети. Процедура синтеза широкополосных демпфирующих фильтров, обеспечивающих минимальное действующее значение высших гармоник, передаваемых многофазным преобразователем во внешнюю сеть, рассмотрена в [16]. Она основана на оптимизации частотных характеристик фильтра в пространстве параметров реактивных элементов.

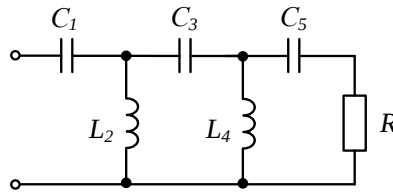


Рис. 4. Односторонне нагруженный LC-четырёхполюсник

Параметры фильтра определяются в процессе минимизации целевой функции, определяемой выражением

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{(k)} \frac{|Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x})|^2}{|Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2, k = 5, 7, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\} \quad (4)$$

В формуле (4) использованы следующие обозначения: $Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x})$ – входное сопротивление фильтра на частоте ω_k ; $Z_c(\omega_k)$ – сопротивление сети на частоте ω_k ; J_k – действующее значение k -й гармоники тока. Подробно процедура оптимизации характеристик фильтра описана в [16].

Нормированные значения элементов фильтров 3–5 порядка, рассчитанных с помощью процедуры оптимизации, рассмотренной в [16], приведены в табл. 1. Фильтры настроены на подавление гармоники с частотой 1 рад/с. Емкость конденсатора C_1 , определяющего реактивную мощность фильтра, принята равной 1 Ф.

Таблица 1

Значения элементов нормированных широкополосных фильтров 3–5 порядка

Порядок фильтра	C_1 , Ф	L_2 , Гн	C_3 , Ф	L_4 , Гн	C_5 , Ф	R, Ом
3	1	0,814	0,259	-	-	1,85
4	1	0,777	0,243	2,127	-	1,85
5	1	0,76	0,216	1,22	0,47	1,85

Рассмотренные широкополосные фильтры предназначены для коррекции коэффициента мощности в системах электроснабжения с трехфазными преобразователями. В случае многофазных нагрузок целесообразно использовать более сложные конфигурации ФКУ, образованные параллельным соединением нескольких широкополосных звеньев.

Аналитический метод расчета широкополосных фильтрокомпенсирующих устройств

Используем нормированные значения элементов фильтров-прототипов для расчета широкополосных фильтров, обладающих требуемыми компенсационными характеристиками. ФКУ образовано параллельным соединением звеньев 3–5 порядка. Отдельные звенья осуществляют ослабление группы соседних гармоник. Исходными данными для расчета являются число звеньев ФКУ, его реактивная мощность Q , значения элементов прототипа, порядковый номер n_i наиболее мощной гармоники в полосе ослабления i -го звена.

Расчет звеньев фильтра проводится в следующей последовательности. Вначале определяется емкость конденсатора C_{i1} , обеспечивающего требуемую величину реактивной мощности ФКУ на частоте основной гармоники f_1 :

$$C_{i1} = \frac{\alpha_i Q}{2\pi f_1 U^2}. \quad (5)$$

Здесь α_i – множитель, определяющий реактивную мощность i -го звена.

На втором шаге осуществляется денормирование реактивных элементов фильтра по частоте:

$$L_{ij}^{(1)} = \frac{L_j^{(0)}}{2\pi n_i f_1}; C_j^{(1)} = \frac{C_j^{(0)}}{2\pi n_i f_1} \quad (6)$$

В последних выражениях $L_j^{(0)}$, $C_j^{(0)}$ - значения элементов нормированного фильтра.

Затем проводится денормирование элементов по мощности на частоте основной гармоники:

$$L_{ij} = k_i L_{ij}^{(1)}; C_{ij} = C_{ij}^{(1)} / k_i; R_i = k_i R^{(0)} \quad (7)$$

где $k = \frac{C_{i1}^{(1)}}{C_{i1}}$ – коэффициент нормирования звена фильтра по уровню реактивной мощности.

На основе формул (5-7) получим окончательные выражения для расчета элементов звеньев ФКУ:

$$C_{ij} = \frac{\alpha_i C_j^{(0)} Q}{2\pi f_1 C_1^{(0)} U^2}; \quad (8)$$

$$L_{ij} = \frac{L_j^{(0)} C_1^{(0)} U^2}{2\pi f_1 \alpha_i n_i^2 Q}; \quad (9)$$

$$R_i = \frac{R_j^{(0)} C_1^{(0)} U^2}{\alpha_i n_i Q} \quad (10)$$

Сопротивление демпфирующего резистора определяет сопротивление i -го звена в полосе ослабления и, соответственно, уровень подавления характеристических и нехарактеристических гармоник в спектре тока. Поэтому можно регулировать компенсационные характеристики ФКУ за счет распределения мощности между звеньями, изменяя коэффициент α_i . Согласно формуле (10) для ослабления наиболее мощных характеристических гармоник целесообразно увеличить мощность соответствующего звена ФКУ.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим применение предлагаемых компенсирующих устройств для коррекции коэффициента мощности в системе электроснабжения алюминиевого завода. Основной нелинейной нагрузкой СЭС являются электролизные установки. Питание установок осуществляется от 12-пульсных выпрямительных агрегатов (ВА), преобразующих переменный ток промышленной частоты в постоянный (рис. 5). Каждый ВА содержит регулировочный трансформатор T_1 , выпрямительные трансформаторы T_2 , T_3 , дроссели насыщения, блок полупроводниковых преобразователей.

Спектр входного тока выпрямительного агрегата представлен в табл. 2. Питание подстанции осуществляется по ЛЭП напряжением 220 кВ длиной 40 км. Мощность одной фазы ФКУ составляет 30 Мвар.

Таблица 2

Спектр тока 12-пульсного выпрямительного агрегата (в процентах от основной гармоники).

№ гармоники	5	7	11	13	17	19	23	25
Действ. значение	2,6	1,6	4,5	2,9	0,2	0,1	0,9	0,8

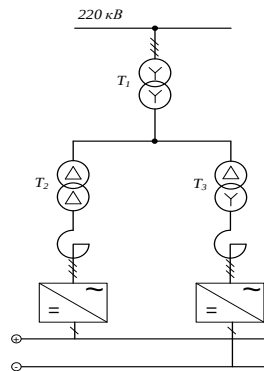


Рис. 5. Схема выпрямительного агрегата

Рассмотрим следующие варианты фильтрокомпенсирующих устройств.

- Компенсирующие устройства отсутствуют.
- На подстанции установлена конденсаторная установка.
- Фильтр С-типа, настроенный на частоту 5-й гармоники.
- Широкополосный фильтр третьего порядка, настроенный на частоту 5-й гармоники.
- ФКУ на основе широкополосных фильтров второго порядка, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Для расчета фильтров использована методика, рассмотренная в [6].
- ФКУ на основе широкополосных фильтров третьего порядка, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Параметры звеньев фильтров определены с помощью процедуры расчета, рассмотренной в предыдущем разделе. Мощности звеньев одинаковы.
- Широкополосные фильтры третьего порядка, настроенные на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Отношение мощностей звеньев: 0,25; 0,25; 0,5.

Все варианты ФКУ имеют одинаковую реактивную мощность на частоте основной гармоники.

На рис. 6, 7 показаны частотные характеристики сопротивления сети в точке общего присоединения ВА и однозвенных компенсирующих устройств (варианты 1 - 4). На рис. 8 показаны спектры напряжений на шинах подстанции.

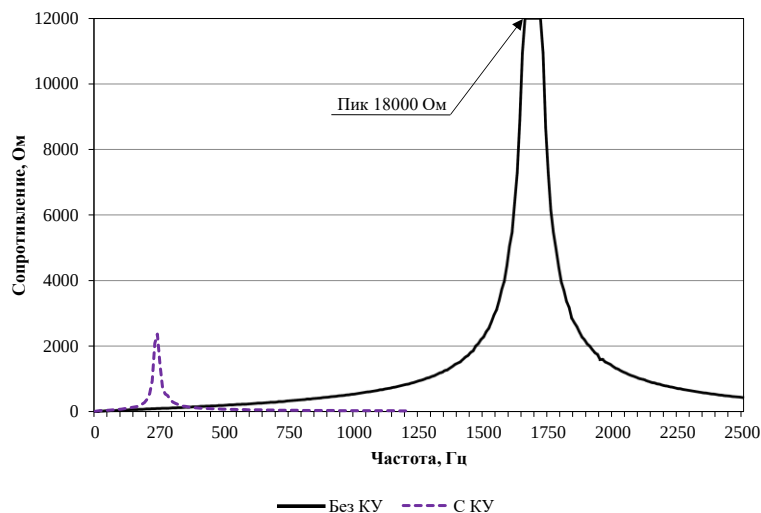


Рис. 6. Частотные характеристики сети (варианты 1, 2)

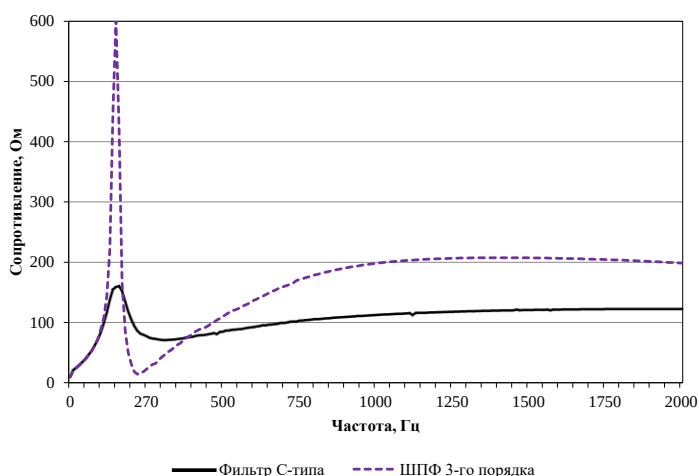


Рис. 7. Частотные характеристики сети при установке однозвенных ФКУ (варианты 3, 4)



Рис. 8. Спектры напряжения на шинах подстанции (варианты компенсирующих устройств 1-4)

В табл. 3 представлены коэффициенты гармонических составляющих напряжения (в процентах по отношению к основной гармонике) для рассмотренных вариантов КУ.

Таблица 3

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при установке рассмотренных вариантов компенсирующих устройств (в процентах от основной гармоники)

Вар.	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(17)}$	$K_{U(19)}$	K_U
1	1,2	1,2	9,28	8,64	0,7	0,8	12,4
2	12,4	1,4	2,9	1,3	0	0	12,75
3	1,06	0,6	3,46	2,8	0,17	0,17	4,6
4	0,11	0,5	4,34	4,0	0,3	0,28	6,7
5	0,4	0,23	0,67	1,3	0,13	0,16	1,55
6	0,53	0,2	0,6	1,44	0,16	0,18	1,59
7	0,69	0,25	0,4	1,08	0,125	0,155	1,38
ГОСТ 32144-2013	1,5	1	1	0,7	0,5	0,4	2,0

Результаты моделирования показывают, что искажения напряжения вызваны резонансом в параллельных колебательных контурах, образованных распределенными индуктивностями и емкостями сети, и значительно превышают допустимые значения, определяемые ГОСТ 32144-2013. Частота резонансного максимума зависит от длины ЛЭП. Включение батареи конденсаторов смещает резонансный максимум в область низкочастотных нехарактеристических гармоник, но результирующие искажения напряжения при этом не уменьшаются.

Однозвенные компенсирующие устройства (варианты 3 и 4) осуществляют ослабление нехарактеристических 5 и 7-й гармоник. Однако они не обладают достаточной избирательностью для одновременного подавления характеристических гармоник. В результате суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает значения, определяемые ГОСТ. Можно настроить однозвенные ФКУ на частоты характеристических гармоник (11 и 13-й). Однако анализ показывает, что в этом случае наблюдается резонансное усиление нехарактеристических гармоник (5 и 7-й). Таким образом, для одновременного ослабления характеристических и нехарактеристических гармоник необходимо использовать ФКУ, включающие несколько широкополосных звеньев. В этом случае каждое звено ослабляет группу соседних гармоник и одновременно демпфирует резонансные максимумы частотной характеристики сети.

Частотные характеристики входного сопротивления сети при установке многозвенных компенсирующих устройств (варианты 5-7) показаны на рис. 9. На рис. 10 показаны спектры напряжения на шинах подстанции.

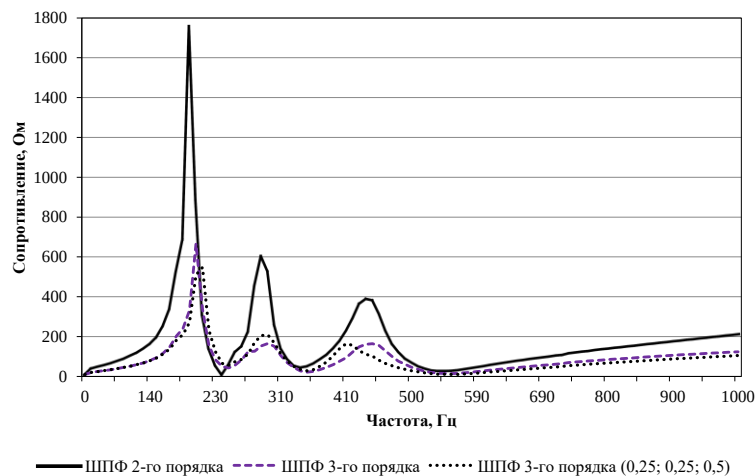


Рис. 9. Частотные характеристики сопротивления сети при установке многозвенных КУ (варианты 5 - 7)

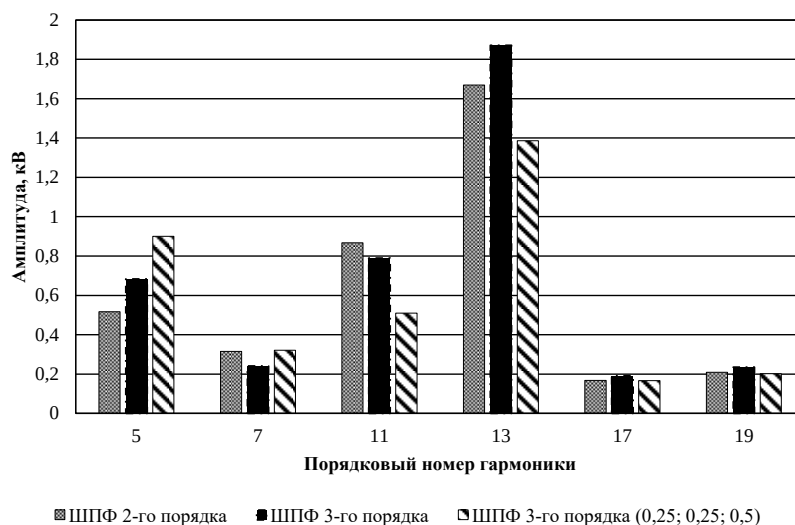


Рис. 10. Спектры напряжения при установке многозвенных ФКУ (варианты 5-7)

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при установке многозвенных ФКУ представлены в табл. 2. Сравнение результатов показывает, что наибольший эффект дает установка ФКУ на основе широкополосных фильтров третьего порядка (варианты 6, 7). Увеличение мощности звена, предназначенного для ослабления характеристических 11 и 13-й гармоник (вариант 7), позволило значительно улучшить компенсационные характеристики устройства.

Одним из важных критериев, определяющих эффективность ФКУ, является активная мощность, потребляемая устройством на частоте основной гармоники. В табл. 4 представлены значения активной мощности, потребляемой рассмотренными многозвенными ФКУ.

Таблица 4

Мощность ФКУ на частоте основной гармоники, кВт

Вариант	Потери в реакторах	Потери в демпфирующих резисторах	Общие потери
5	17,6	7,0	24,6
6	16,0	0,6	16,6
7	11,6	0,5	12,1

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что уменьшение активной мощности, потребляемой ФКУ на частоте основной гармоники, достигается в первую очередь за счет снижения потерь в демпфирующих резисторах ШПФ.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для коррекции коэффициента мощности и снижения уровня гармоник в системах электроснабжения с многофазными нагрузками целесообразно использовать ФКУ на основе параллельного соединения широкополосных демпфирующих звеньев 3–5 порядка. Такие ФКУ обеспечивают эффективное подавление как характеристических, так и нехарактеристических гармонических составляющих.

Закключение

Анализ, проведенный в статье, показал, что установка конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками вызывает значительные искажения напряжения, обусловленные резонансным усилением отдельных гармоник. В качестве устройств поперечной емкостной компенсации в таких сетях целесообразно использовать широкополосные силовые фильтры, позволяющие ослабить резонансное усиление гармоник за счет демпфирования частотных характеристик системы электроснабжения.

В статье рассмотрены ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных фильтров 3–5 порядка, осуществляющие ослабление характеристических и нехарактеристических гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками. Предложен аналитический метод расчета звеньев ФКУ, основанный на денормировании параметров фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности. Метод позволяет варьировать уровень ослабления отдельных гармоник, передаваемых во внешнюю сеть, за счет распределения мощности компенсирующего устройства между звеньями.

Моделирование показало, что ФКУ на основе широкополосных звеньев третьего порядка позволяют компенсировать реактивную мощность, а также снизить уровень гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками, до значений, определяемых ГОСТ 32144-2013. Предлагаемые ФКУ имеют меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными решениями.

Литература

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд. М., Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
2. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Качество электроэнергии в ЕЭС России: текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия: Передача и распределение. 2016. № 2 (35). С. 28-38.
3. Rodríguez J., Pontt J., Silva C., et al. Large Current Rectifiers: State of the Art and Future Trends. – IEEE trans. on Industrial Electronics. 2005. V. 52. No 3. pp. 738-745.
4. Singh B., Gairola S., Singh B. N., et al. Multipulse AC–DC Converters for Improving Power Quality: A Review – IEEE trans. on Power Electronics. 2008, V. 23. No. 1. pp. 260-281.

5. Zhiheng M., Zheng X., Yujun L. Harmonic Analysis and Simulation of Multi-pulse Rectifiers Applied in Electrolysis Industry. 2014 IEEE Industry application society annual meeting, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/IAS.2014.6978498.
6. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. – IEEE trans. on Industry Applications. 2011. V. 47. No 2, pp. 973-983.
7. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE trans. on Power Delivery. 2017. V. 32. No. 1. pp. 117-124.
8. Wang Y., Xu W. A Shared Resonance Damping Scheme for Multiple Switchable Capacitors. IEEE trans. on Power Delivery. 2018. V. 33. No.42. pp. 1973-1980.
9. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020. V. 35. No. 4. pp. 1725-1734.
10. Xu W., Ding T., Li X., Liang H. Resonance-Free Shunt Capacitors – Configurations, Design Methods and Comparative Analysis. IEEE trans. on Power Delivery. 2016. V. 31. No. 5. pp. 2287-2295.
11. Li X., Wang Y., Xu W. A new filtering scheme for HVDC terminals based on damped high-pass filter. – IEEE trans. on Power Delivery. 2019. V. 34. No 5. pp. 2050-2057.
12. Ding T., Xu W., Liang H. Design method for third-order High-pass filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2016. V. 31.No 1. pp. 402-403.
13. Довгун В.П., Боярская Н.П., Егоров Д.Э., Синяговский А.Ф. Синтез широкополосных фильтров гармоник // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5-6. С. 85-91.
14. Das J. Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives – A Case Study. – IEEE trans. on Industry Applications. 2015. V. 51. No 2. pp. 1417-1426.
15. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Звягинцев Е.С. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров. Электричество. 2018. № 12. С. 14-21.
16. Dovgun V.P., Egorov D.E., Prozorov N. R., Novikov V.V. Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. Russian Electrical Engineering. 2020. V. 91. No. 5. pp. 330-334.

Авторы публикации

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: denis.egorov.90@br.ru.

Довгун Валерий Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет. E-mail: vdovgun55@mail.ru.

Боярская Наталия Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедры ТОЭ, Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru.

Ян Анастасия Владимировна – магистрант, Сибирский федеральный университет. E-mail: anastasiya2591@bk.ru.

Слюсарев Александр Сергеевич – магистрант, Сибирский федеральный университет. E-mail: al_sl@list.ru.

References

1. Zhezhelenko IV. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyatii*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
2. Kovernikova LI, Tulckiy VN, Shamonov RG. Kachestvo elektrenergii v EES Rosii, tekustchie problem I neobkhodimye resheniya. *Elektroenergiya. Peredatcha I raspredelenie*. 2016;2 (35):28-38.
3. Rodríguez J, Pontt J, Silva C, et al. *Large Current Rectifiers: State of the Art and Future Trends*. – IEEE trans. on Industrial Electronics. 2005;52(3):738-745.
4. Singh B, Gairola S, Singh BN, et al. *Multipulse AC–DC Converters for Improving Power Quality: A Review*. IEEE trans. on Power Electronics. 2008;23(1):260-281.
5. Zhiheng M., Zheng X., Yujun L. *Harmonic Analysis and Simulation of Multi-pulse Rectifiers Applied in Electrolysis Industry*. 2014 IEEE Industry application society annual meeting, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/IAS.2014.6978498.
6. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. *Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant*. IEEE trans. on Industry Applications. 2011;47(2):973-983.

7. Li X, Xu W, Ding T. *Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems*. IEEE trans. on Power Delivery. 2017;32(1):117-124.
8. Wang Y, Xu W. *A Shared Resonance Damping Scheme for Multiple Switchable Capacitors*. IEEE trans. on Power Delivery. 2018;33(4):1973-1980.
9. Wang Y, Xu S, Xu W, Wu J., Xiao X. *Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2020;35(4):1725-1734.
10. Xu W, Ding T, Li X, Liang H. *Resonance-Free Shunt Capacitors – Configurations, Design Methods and Comparative Analysis*. IEEE trans. on Power Delivery. 2016;31(5):2287-2295.
11. Li X, Wang Y, Xu W. *A new filtering scheme for HVDC terminals based on damped high-pass filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2019;34(5):2050-2057.
12. Ding T, Xu W, Liang H. *Design method for third-order High-pass filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2016;31(1):402-403.
13. Dovgun VP, Boyarskaya NP, Egorov D.E., et al. *Sintez shirokopolosnykh filtrov garmonik. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2014;5-6:85-91.
14. Das J. *Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives A Case Study*. IEEE trans. on Industry Applications. 2015;51(2):1417-1426.
15. Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, et al. *Parametritcheskii sintez shirokopolosnykh filtrov - Elektrichestvo*. 2018;12:14-21.
16. Dovgun VP, Egorov DE, Prozorov NR, et al. *Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. Russian Electrical Engineering*. 2020;91(5):330-334.

Authors of the publication

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: denis.egorov.90@br.ru.

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: vdovgun55@mail.ru.

Nataliya P. Boyarskaya – Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru.

Anastasiya V. Yan – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: anastasiya2591@bk.ru.

Aleksandr S. Slusarev – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: al_sl@list.ru.

Получено

06 ноября 2020 г.

Отредактировано

09 ноября 2020 г.

Принято

09 ноября 2020 г.



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ И АДАПТАЦИИ
ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
ПАО «ТАТНЕФТЬ»**

Л.Р. Мухаметова, И.Г. Ахметова, Д.А. Зарипова, А.Р. Нурисламова

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
liliyamyhametova@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть внедрение и реализацию технологии бережливого производства в филиалах ООО «Татнефть – АЗС Центр». Описать сущность технологии, рассмотреть проблемы, сложность внедрения и предложить алгоритм внедрения технологии и вовлечения в процесс оптимизации бизнеса каждого сотрудника и максимальную ориентацию на потребителя. *МЕТОДЫ.* На начальном этапе было принято решение начать внедрение философии Бережливого производства с двух его инструментов: кайдзен и 5S. Используя философию непрерывного улучшения Кайдзен, была разработана и формализована система кайдзен-предложений. С целью материального стимулирования работников на каждом рабочем месте было принято «Положение о системе непрерывного совершенствования производственной системы ООО «Татнефть-АЗС Центр», которое регламентирует и регулирует процесс подачи и оценки кайдзен-предложений. Для внедрения системы 5S разработан, обсужден во всех трудовых коллективах и принят стандарт «Применение системы 5S при организации рабочего места», на основании которого начато внедрение системы 5S во всех филиалах ООО «Татнефть-АЗС Центр». *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описано применение достаточно широкого и разнообразного спектра инструментов Бережливого производства: кайдзен-предложения, 5С, стандартизация, ТРМ, визуализация, SFM – визуальный менеджмент, карты потока создания ценности. Инструменты различаются как по времени и продолжительности внедрения, так и по их эффективности. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В рамках адаптации принципов Бережливого производства к рознично-сбытовой сети нефтепродуктов ООО «Татнефть-АЗС Центр» первичными факторами являются отраслевая и организационная специфика.

Ключевые слова: бережливое производство, кайдзен-технологии, система 5-S, рознично-сбытовая сеть.

Для цитирования: Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Зарипова Д.А., Нурисламова А.Р. Повышение энергоэффективности теплотехнического оборудования и ресурсосбережения при внедрении и адаптации инструментов бережливого производства на предприятиях ПАО «Татнефть» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 16-28. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-16-28.

**ENERGY EFFICIENCY OF HEATING EQUIPMENT AND RESOURCES IN THE
IMPLEMENTATION AND ADAPTION OF LEAN MANUFACTURING TOOLS LLC
TATNEFT-AZS CENTER**

LR. Mukhametova, IG. Akhmetova, DA. Zaripova, AR. Nurislamova

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia
liliyamyhametova@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the introduction and implementation of lean production technology in the branches of ООО Tatneft - AZS Center. Describe the essence of the technology, consider the problems, the complexity of implementation and propose an algorithm for introducing the technology and involving each employee in the process of optimizing the business and maximizing customer focus. *METHODS.* At the initial stage, it was decided to start implementing the Lean philosophy with two of its tools: kaizen and 5S. Using the philosophy of

continuous improvement Kaizen, a system of kaizen sentences was developed and formalized. In order to provide material incentives for employees at each workplace, the Regulation on the system of continuous improvement of the production system of OOO Tatneft-AZS Center was adopted, which regulates and regulates the process of submitting and evaluating kaizen proposals. For the implementation of the 5S system, the standard "Application of the 5S system in the organization of a workplace" was developed, discussed in all labor collectives and adopted, on the basis of which the implementation of the 5S system was started in all branches of OOO Tatneft-AZS Center. RESULTS. The article describes the use of a fairly wide and varied range of Lean manufacturing tools: kaizen proposals, 5C, standardization, TPM, visualization, SFM-visual management, value stream maps. The tools differ in both the time and duration of implementation and their effectiveness. CONCLUSION. Within the framework of adapting the principles of Lean production to the retail and sales network of oil products of OOO Tatneft-AZS Center, the primary factors are industry and organizational specifics.

Keywords: lean manufacturing, kaizen technology, 5-S system, retail and distribution network.

For citation: Mukhametova LR, Akhmetova IG, Zaripova DA, Nurislamova AR. Energy efficiency of heating equipment and resources in the implementation and adaption of lean manufacturing tools LLC TATNEFT-AZS center. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):16-28. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-16-28.

Введение и литературный обзор

Внедрение инструментов Бережливого производства в филиалах ООО «Татнефть-АЗС Центр» началось в 2013 году. В соответствии с философией Бережливого производства, в первую очередь, было начато поэтапное обучение руководящего состава как самой головной организации, так и руководства коллектива филиалов на всех уровнях менеджмента: от Генерального директора до мастеров в АЗС. Главная цель этапа обучения – понять суть философии, ее принципы с тем, чтобы эффективно реализовать ее на всех уровнях. Первоначальное обучение проводилось на базе передового предприятия в части внедрения инструментов Бережливого производства – ПАО «КАМАЗ». Сложность состояла в необходимости адаптации каждого отдельно взятого инструмента из опыта стационарного поточного производства машиностроения в производственный процесс автозаправочных станций (АЗС). [1, с.28] С этой целью в головной компании и в филиалах были созданы постоянно действующие рабочие группы. Цель этого этапа – полная осведомленность и вовлечение персонала в процесс поэтапного внедрения инструментов бережливого производства.

Материалы и методы

На начальном этапе было принято решение начать внедрение философии Бережливого производства с двух его инструментов:

- кайдзен – непрерывные улучшения деятельности,
- 5С – Сортируй (Sorting), Создай место (Straighten), Содержи в чистоте (Sweeping), Стандартизируй (Standardizing), Совершенствуй (Sustaining). [2, с.114]

Для этого, используя философию непрерывного улучшения Кайдзен, была разработана и формализована система кайдзен-предложений. С целью материального стимулирования работников на каждом рабочем месте было принято «Положение о системе непрерывного совершенствования производственной системы ООО «Татнефть-АЗС Центр», которое регламентирует и регулирует процесс подачи и оценки кайдзен-предложений.

Примером кайдзен-предложения может служить следующее: на всасывающем насосе по перекачке нефтепродуктов часто выходил из строя датчик температуры, поскольку он слишком близко находился к электродвигателю насоса. Решение было очень простым — оградить датчик защитным устройством. На производстве всегда можно найти немало вариантов для улучшений, тем более исполнитель на этом может дополнительно заработать. [3, с.32]

Схему движения кайдзен-предложений можно описать следующим образом: у работника возникает идея, позволяющая улучшить какую-либо производственную операцию, весь производственный процесс или даже вид деятельности с извлечением положительного эффекта без значительных капитальных затрат (затраты на внедрение менее 200 тыс. рублей). Он формулирует свое предложение на бланке установленного образца и относит руководителю подразделения. Руководитель пишет заключение по

поводу возможности и сроков внедрения и передает предложение секретарю рабочей группы для оценки инициативных предложений. Секретарь, в свою очередь, организует оценку этого предложения членами рабочей группы и, получив оцененные предложения, собирает совещание рабочей группы, где принимаются решения о сроках, механизмах внедрения, размерах вознаграждений по предложениям, а также возможности применения в других подразделениях и производствах.

Если рабочая группа принимает предложение работника к внедрению, то выплачивается премия за подачу идеи. После внедрения предложения и начала реализации идеи составляется отчет с фотографиями «было-стало», на основании которого выплачивается оставшаяся часть вознаграждения, которая может достигать 2700 рублей. [4, с.69].

Если поданное кайдзен-предложение приносит значительный экономический эффект, то по решению рабочей группы оно может быть оформлено как рационализаторское, и работнику может быть выплачена более существенная сумма. Таким образом, работники, которые непрерывно участвуют в работах по улучшению производственного процесса, могут рассчитывать на то, что их деятельность также может быть отмечена и оценена.

Тем самым для работников кайдзен-предложения – это не только дополнительный доход, но и возможность профессионального роста, поскольку все предложения собираются и анализируются рабочей группой. А это позволяет выявить творчески мыслящих людей и, соответственно, нереализованный потенциал сотрудников. [5, с.171]

В этой связи классическое представление о потерях, представленное на рис. 1 данной статьи, видоизменяется относительно специфики функционирования сети АЗС и опыта его внедрения. Считаем целесообразным исключить из состава потерь следующие процессы, так как рознично-сбытовая сеть АЗС не занимается производством, а исключительно перепродажей нефтепродуктов:

- перепроизводство,
- излишнюю обработку,
- переналадки, дефекты, брак.

В свою очередь, считаем, что своевременно нереализованный потенциал сотрудников также является потерей для предприятия. Под этим мы понимаем потери идей, возможностей, навыков, опыта из-за невнимательного отношения руководства к персоналу. Тогда совокупность потерь для рознично-сбытовой сети примет иной вид (рис. 1).

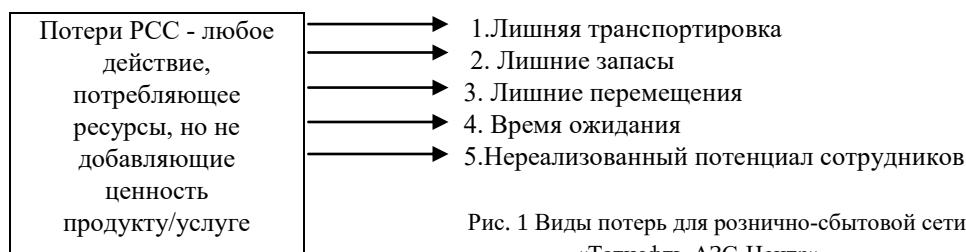


Рис. 1 Виды потерь для рознично-сбытовой сети ООО «Татнефть-АЗС-Центр»

Внедрение системы 5С для организации пространства рабочего места потребовало дополнительного специализированного обучения именно данному элементу. Был разработан, обсужден во всех трудовых коллективах и принят стандарт «Применение системы 5С при организации рабочего места», на основании которого начато внедрение системы 5С во всех филиалах ООО «Татнефть-АЗС Центр».

Порядок действий по применению принципов 5С в работе оператора АЗС представлено в табл. 1.

Уменьшилось время на поиск различных инструментов и комплектующих, а значит, и на устранение неполадок. В ящиках наварили ячейки, в которые разложили запчасти и материалы по порядку, инструментам выделили специально отведенные места, привели в порядок и покрасили оборудование, разграничили каждый метр территории и закрепили за ней ответственных, наложили разметку, рационально расставили шкафы. [6]

В результате выявлены причины возникновения потерь времени оператора АЗС при обслуживании клиентов:

- при обслуживании банковским терминалом необходим дополнительный поворот корпуса оператора (терминал находится сбоку),
- при работе с терминалами ТК ТН и ЛНР клавиатура создает помехи,
- отсутствие зрительного контакта с клиентом,
- лишние предметы на рабочем столе.

Таблица 1

Применение принципов 5С в работе оператора АЗС

№ п/п	Принцип	Применение
1	Сортировка	Установлены критерии необходимости предметов на рабочем месте. Определены предметы, которые необходимы в работе операторов
2	Создание места	Расположение предметов таким образом, чтобы их было легко использовать, легко находить и возвращать на место. Наиболее часто используемые предметы должны располагаться ближе к оператору
3	Содержание в чистоте	Предметы на рабочем месте оператора АЗС должны находиться на своих определенных местах, в чистоте и готовности к применению, при этом должны быть обеспечены быстрота, легкость и безопасность доступа к предметам
4	Стандартизация	Содержание рабочего места было закреплено письменно и графически, визуализировано в стандарт, который размещен около оператора
5	Совершенствование	Соблюдение стандарта рабочего места, что позволяет оперативно находить предметы, тем самым увеличивая скорость обслуживания клиентов, и сокращать время на проведение других вспомогательных операций

Способы устранения потерь времени при обслуживании клиентов на АЗС представлены в табл.2.

Таблица 2

Способы устранения потерь времени при обслуживании клиентов на АЗС

№ п/п	Проблема	Способ устранения
1	Неудобное расположение рабочих принадлежностей (монитор, клавиатура, терминалы, громкая связь, ККМ, детектор купюр, денежный лоток)	Определение оптимального расположения рабочих принадлежностей для исключения лишних движений
2	Положение оператора относительно клиента. Отсутствие зрительного контакта с клиентом. Исходный вариант – рабочее место «стоя»	Перемещение рабочих принадлежностей на верхнюю поверхность рабочей зоны
3	Неудобная стойка оператора	Замена стоек. Поиск альтернативных вариантов организации рабочего места оператора АЗС
4	Техническое состояние терминального оборудования: ТК ТН и ЛНР, банковских терминалов	Проведение работы с ООО «Процессинговый центр», ОАО «Сбербанк России», ОАО «Девон-Кредит»
5	Лишние предметы на рабочем столе оператора	Определение перечня предметов, которые необходимы в работе оператора

Проведенные мероприятия по организации рабочего места оператора АЗС позволили сократить время на выполнение операций по обслуживанию клиентов по видам оплаты (рис. 2). [6, с.71] За счет совершенствования рабочего места оператора АЗС обслуживание по каждому виду оплаты сократилось на 2,8 секунд в расчете на 1 транспортное средство (табл. 3). За счет совершенствования технических возможностей:

- обслуживание по карте ТК ТН сократилось на 3,2 с.,
- обслуживание по карте ЛНР сократилось на 2,4 с.,
- обслуживание по банковской карте сократилось на 4,5 с.

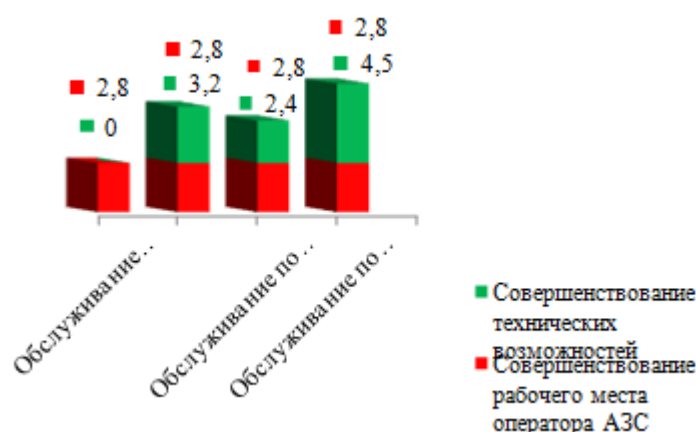


Рис.2 Результаты применения системы 5С – сокращение времени на обслуживание клиентов до и после стандартизации

Таблица 3

Результаты применения системы 5С на АЗС ООО «Татнефть-АЗС Центр»

Вид обслуживания	Время обслуживания относительно стандартизации, с.		Сокращение времени, с.	Сокращение времени, %
	до	после		
За наличный расчет	24,6	21,8	-2,8	11,4
По карте ТК ТН	28,9	22,9	-6,0	20,8
По карте ЛНР	34,7	29,5	-5,2	15,0
По банковским картам	47,3	40,0	-7,3	15,4

В табл. 4 представлена методика расчета экономии затрат рабочего времени в результате применения системы 5С при обслуживании клиентов.

Таблица 4

Расчет экономии затрат рабочего времени в результате применения системы 5С при обслуживании клиентов

Показатель	Наличный расчет	ТК ТН	ЛНР	Безналичный расчет	Итого
Количество клиентов в час	21,1				
Распределение клиентов по способам оплаты, %	14	62	20	4	100
Сокращение времени на обслуживание клиента, с.	2,8	6	5,2	7,3	21,3
Сокращение времени в час, с.	8,3	78,5	21,9	6,2	114,9
Сокращение времени в сутки, мин.	3,3	31,4	8,8	2,5	46
Итого в среднем 46 минут в сутки на каждую АЗС					

При расчете экономии затрат рабочего времени в результате применения системы 5С при организации рабочего места оператора АЗС количество клиентов в час учитывалось по среднему значению в часы повышенной проходимости автотранспорта на 1 АЗС. [7] Поскольку затраты времени на обслуживание одного клиента зависят от вида оплаты, то целесообразно определить структуру клиентов по способам оплаты среднего значения автотранспорта в часы повышенной проходимости. Статистика показала, что 14% клиентов расплачиваются наличными денежными средствами, 62% топливными картами ПАО «Татнефть», 20% клиентов картами ЛНР и только 4% иными видами банковских карт («Сбербанк», «Девон-Кредит» и т.д.). Сокращение времени в час (Δt_i) предлагаем

рассчитывать по способам оплаты в следующем порядке:

$$\Delta t_i = \text{Чк} * \text{УДки} * \Delta t_{ki}, \quad (1)$$

где Чк – количество клиентов в час, УДки – удельная доля клиентов по *i*-тому способу оплаты, Δt_{ki} – сокращение времени на обслуживание клиента по *i*-тому способу оплаты, с. [3, с.68]

Например, сокращение затрат времени при обслуживании за наличный расчет в течение часа работы АЗС составит: $21,1 \times 0,14 \times 2,8 \text{ с.} = 8,3 \text{ с.}$

Суточное сокращение затрат времени при обслуживании за наличный расчет при круглосуточном режиме работы АЗС:

$$8,3 \text{ с.} \times 24 \text{ час.} = 199 \text{ с.} = 3,32 \text{ мин.}$$

Расчет по данной методике показал, что в среднем на АЗС в результате применения принципов 5С при обслуживании клиентов экономия затрат времени составляет 46 минут.

В аналогичной последовательности применение принципов 5С на всех рабочих местах позволило сократить затраты рабочего времени и на иные производственные операции.

Опыт показал, что соблюдение основных принципов системы 5С позволяет отчетливо представлять проблемы; работать лучше, но не больше; обеспечить безопасность, качество, эффективность и устранение потерь. [4, с. 171].

Таким образом, результатом первого этапа внедрения бережливого производства явились:

- отлаженная, действующая и формализованная система кайдзен-предложений,
- внедрение принципов 5С на 100% рабочих мест.

Следующим этапом внедрения Бережливого производства явилась стандартизация как точное описание каждого действия и его формализация в Карте стандартизированной работы или в Стандартизированной операционной карте (СОК). Карта представляет собой наглядную схему производственного процесса, на которой показано расположение оборудования и материалов. В данной форме показаны движения операторов и расположения материалов по отношению к оборудованию, а также общая компоновка оборудования. Формы стандартизированной работы помогают:

- обнаружить проблемы, которые не видны при проведении наблюдений,
- сравнить результаты проделанной работы,
- сократить время для анализа ситуации на рабочем месте, участке,
- систематизировать подход к анализу работы. [8, с. 251]

В течение второго этапа внедрения Бережливого производства в ООО «Татнефть-АЗС-Центр» стандартизированы и формализованы:

- работы по сливу СУГ с обязательным присутствием мастера,
- работы по приему ЖМТ (при обязательном присутствии мастера, 8-часового оператора) РГС без уровнемера,
- работы по приему ЖМТ (при обязательном присутствии мастера, 8-часового оператора) с установленным уровнемером,
- процесс зачистки стандартной АЗС с 4 резервуарами,
- процесс градуировки 4 резервуаров по 25 м³,
- пересменка – передача данных по остаткам (нефтепродукты, товары потребления, денежные средства в кассе),
- процесс одновременного слива и реализации нефтепродуктов на АЗС,
- процесс ночного приема СУГ.

Таким образом, стандартизация вкупе с применением принципов 5С позволило существенно сократить затраты времени на производственные процессы и операции.

Параллельно с работами по стандартизации проводились работы по внедрению правил *Total Productive Maintenance (TPM)* или всеобщий уход за оборудованием – такое отношение к оборудованию, при котором оно поддерживается в идеальном рабочем состоянии. Это комплексный подход к уходу за оборудованием, цель которого – достижение совершенного производства без поломок, остановок, медленного хода, брака и несчастных случаев. [9, с.24] В основе TPM проактивный и превентивный уход для повышения операционной эффективности оборудования. Система TPM стирает границы между работой на станке и уходом за ним и наделяет операторов полномочиями заботиться о своем оборудовании. Внедрение программы TPM возлагает на рабочих ответственность за оборудование и стимулирует вовлеченность цехового персонала в повышение производительности.

Таблица 5

Результаты проведенных мероприятий по применению инструментов Бережливого производства в рознично-сбытовой сети ООО «Татнефть-АЗС-Центр»

Мероприятия	До	После
Пересменка – передача данных по остаткам (нефтепродукты, товары потребления, денежные средства в кассе)	15 минут в день	4 минуты в день
Инвентаризация ГСМ	30 минут в месяц	Без простоя объекта
Прием (слив) топлива с топливозовоза в резервуары АЗС	40 минут	Проводить одновременно с отпуском топлива потребителю
Зачистка резервуара	1 раз в два года	
	24 часа	13 часов

Сокращение времени простоев влияет на общую эффективность оборудования, что в свою очередь отражается на объемах, реализуемых ГСМ. Задача ремонтно-эксплуатационного цеха – обеспечение бесперебойной работы оборудования АЗС. Анализ простоев АЗС показал наличие резервов для сокращения времени простоев оборудования. [10,с.16]

Наибольшее влияние на простои оборудования АЗС оказали действия по приему нефтепродуктов и пересменка. Проведенные мероприятия по сокращению времени на выполнение этих операция позволяет сократить время простоя оборудования АЗС и повысить общую эффективность оборудования в части его доступности к работе.

Автономное обслуживание оборудования позволяет выявлять неисправности в работе оборудования на ранних стадиях, предупреждать серьезные поломки и остановку оборудования.

В данное обслуживание входят визуальный осмотр оборудования, содержание оборудования в чистоте, контроль герметичности наружных узлов, контроль отсутствия постороннего шума, вибрации, загазованности.

Таблица 6

Фрагмент Визуального пособия ТРМ по обслуживанию топливно-раздаточной колонки (ТРК) на АЗС ООО «Татнефть-АЗС Центр»

№ операции	Зона контроля	Инструмент	Периодичность	Ответственный
	Параметр контроля			
1.1	Внешние поверхности ТРК	ветошь	ежедневно	оператор
	Протирка, чистка внешних панелей ТРК			
1.2	Шланги и раздаточный пистолет	ветошь	ежедневно	оператор
	Чистка от загрязнений, проверка на герметичность			
1.3	Внутреннее пространство ТРК	визуально	ежедневно	оператор
	Проверка на отсутствие посторонних шумов и вибрации			
1.4	Островок ТРК, площадка остановки (заправки) транспорта	песок, метла, совок, ветошь	ежедневно	оператор
	Чистка от загрязнений, уборка розливов нефтепродуктов			
1.5	Блок индикации	визуально	ежедневно	оператор
	Проверка на наличие подсветки и внешней исправности			
1. Работы проводить в спецодежде				
2. Искробезопасные инструменты				

В РСС нефтяной компании на основное оборудования АЗС, задействованное в реализации ГСМ, были разработаны визуальные пособия и чек-листы. [11, с.13]

Визуальное пособие – это документ, содержащий фото приемлемого состояния оборудования, описание выполняемых работ по его обслуживанию и периодичности выполнения с указанием вида и места инструментов, периодичности и ответственного исполнителя (табл. 6).

При обнаружении неисправности, поступлении информации, касающийся жизнеобеспечения АЗС (отсутствие нефтепродуктов, отключение электроэнергии, ремонтные работы, остановка технологического оборудования, простой АЗС), а также других потребностей АЗС (включая все расходные материалы, запасные части ТРК и оборудования, канцелярские и хозяйственные товары), оператор либо непосредственное руководство АЗС, обязаны незамедлительно сообщить об этом в Единую службу сервисной поддержки объектов, а в чек-листе производится пометка красным маркером и краткое описание неисправности.¹

Мониторинг заявок на устранение неисправностей оборудования АЗС осуществляется с использованием системы «*Intra Service*», что позволяет не только сделать процесс подачи заявки интерактивным, но и вести статистику о количестве заявок, продолжительности простоя оборудования в ремонте и причинах его простоя.

В процессе поэтапного внедрения указанных инструментов бережливого производства постепенно включались два не менее важных принципа:

- визуализация,

- управление процессами из места создания ценности *SFM (Shop Floor Management)*.

Визуализация предполагает размещение материальных объектов и информации в рабочей зоне таким способом, при котором заинтересованные стороны могут быстро оценить ход выполняемых работ и динамику их результатов, чтобы оперативно принять необходимые меры в том случае, если имеются отклонения. В процессе визуализации применяются наглядные средства, информирующие о том, как должна выполняться работа. Цель визуализации на АЗС: информирование и контроль, идентификация и отображение местонахождения предметов; отображение информации о производственном статусе; описание стандартных процессов представления информации по производственным показателям; распространение информации о нововведениях и усовершенствованиях.

На АЗС ООО «Татнефть-АЗС Центр» применяют следующие элементы визуального контроля:

- оконтуривание – четкие границы между рабочими зонами, направление движения потока, контур мест хранения приспособлений и инструментов;

- цветовая маркировка – указывает назначение инструментов и приспособлений;

- метод дорожных знаков – указание на предметы (что, где и в каком количестве);

- маркировка краской – выделение местонахождения чего-нибудь на полу или в проходах, например, разделительная линия между рабочими зонами и транспортными проездами;

- андон – в виде панели, монитора или информационного табло с указанием вида ГСМ и цен для различных категорий покупателей. [12, с.57]

Управление процессами из места создания ценности *SFM (Shop Floor Management)* – это своего рода визуальный менеджмент, инструмент информирования о состоянии производства на основе ключевых показателей эффективности (*KPI*) для планирования последующей деятельности.

В РСС ПАО «Татнефть» принят единый Стандарт по *SFM*, цель которого создать систему оперативного управления на основе отслеживания ключевых показателей эффективности, выявления отклонений по *KPI* и решения проблем с помощью визуализации процессов управления. Определены следующие показатели управления процессами в соответствии со Стандартом *SFM*: безопасность, качество, поставки, продажи, инвестиции и развитие, корпоративная культура и вовлеченность персонала. Основой оперативного управления является инфоцентр – комплект магнитно-маркерных досок для размещения разделов информации: цели, планы визуализированные *KPI* – ТОП 3 проблем по показателям (безопасность, качество, поставки, продажи, инвестиции и развитие, корпоративная культура и вовлеченность персонала). Инфоцентр является местом проведения регулярных совещаний в соответствии с графиком.

¹ Положения предприятия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tatneft.ru/aktsioneram-i-investoram/vnutrennie-dokumenti-obshchestva?lang=ru>

Таблица 7

Схема взаимосвязанных планов и отчетности ПСС ПАО «Татнефть»

Постановка задач	План реализации задач	Период планирования	Период контроля и отчетности по бухгалтерским данным	Период контроля и отчетности по оперативным данным (зона SFM)
Blue Sky PCC	План PCC	1 год	1 год	-
		1 месяц	1 месяц	еженедельно
План PCC	План РБЕ	1 год	1 год	-
		1 месяц	1 месяц	еженедельно
План филиалов	План по объектам PCC	1 месяц	1 месяц	сутки

Инфоцентр позволяет обеспечить взаимосвязь планов и отчетности на всех уровнях всей рознично-сбытовой сети ПАО «Татнефть» (табл. 7). При этом *Blue Sky PCC* представляет собой метод сбора или отбора идей со всех уровней организации, подразумевающий их обсуждения, согласование ключевых элементов и преобразование их в иллюстрированное видение компании.²

Таким образом, визуализация и визуальный менеджмент повышают оперативность выполнения работ и принятия управленческих решений. Однако более значимая функция данных методов заключается в постоянной сверке оперативных и тактических решений со стратегическими целями Компании ПАО «Татнефть» в целом. Это действенный элемент стратегического контроллинга.

Дальнейшим этапом внедрения инструментов Бережливого производства явилось составление карт потока создания ценности по продуктам и сопутствующим услугам. Карта потока создания ценности позволяет увидеть процесс как цепочку связанных между собой операций и на основе его анализа выявить все непроизводительные затраты и процессы, и, следовательно, разработать план улучшений.³

Карта потока создания ценности позволяет выявить проблемные области, связанные с потерями: например, излишние запасы, незавершенное производство, потери времени на ожидания, неравномерности и перенапряжения деятельности при создании ценности. Карта потока создания ценности также позволяет выявить некорректно выстроенные процессы планирования и организации деятельности компании, не создающие ценность с точки зрения клиента. Для примера рассмотрим карту потока создания ценности по реализации нефтепродуктов, получаемых с нефтебазы. На нефтебазе Челнинского филиала карта выглядит следующим образом (Рис. 4).



Рис.4 Карта потока создания ценностей разработана по принципам Бережливого производства на Челнинском филиале ООО «Татнефть-АЗС Центр»

² Стандарты предприятия [Электронный ресурс]. Режим доступа:

³ Отчеты о выполнении планов, программ организации [Электронный ресурс]. Режим доступа:

Карта создания потока ценности на ЧФ Татнефть АЗС Центр состоит из следующих основных этапов и элементов.

1. Поставщик – ПАО «Татнефть». Также поставщиками на АЗС ПАО «Татнефть», находящихся в зоне ответственности ООО «Татнефть-АЗС Центр», реализуются нефтепродукты, выпускаемые АО «ТАНЕКО», группой Уфимских НПЗ, ОАО «ТАИФ-НК» и другими.

2. Транспортировка – время перемещение СУГ (сжиженный углеводородный газ) и ЖМТ (жидкое моторное топливо) от поставщика на нефтебазу варьируется в зависимости от того, кто является поставщиком.

3. Слив нефтепродуктов в резервуар на нефтебазе – процесс слива СУГ и ЖМТ в резервуар варьируется в зависимости от способа слива. Слив нефтепродуктов из автотранспортных цистерн проводится самотеком или с помощью насосов автоцистерн в наземные резервуары, а также может выполняться в горизонтальные и вертикальные наземные резервуары.

4. Хранение – в том случае, если нефтепродукты доставляются из других регионов, необходимо заблаговременно подготовить заявку для получения и последующего хранения на нефтебазе.

5. Налив нефтепродуктов в автоцистерну производится верхним и нижним способом. По причине быстрой испаряемости бензина и недопущения загрязнения воздуха выше предельной нормы налив нефтепродуктов выполняется всегда нижним способом с применением рекуперации. Налив нефтепродуктов сопровождается повышенной опасностью. Именно поэтому все установки для налива нефтепродуктов должны обеспечивать пожарную безопасность и автоматически отключаться при заполнении автоцистерны или другой емкости.

6. Транспортировка нефтепродуктов на Челнинские АГЗС. Нефтепродукты транспортируют, как правило, одиночными автомобилями (автопоездами) – цистернами в черте городов – по утвержденным маршрутам.

7. Слив нефтепродуктов в резервуар на АГЗС производится нижним закрытым способом с помощью насоса. Слив нефтепродуктов в резервуары АЗС допускается производить только через сливные фильтры в присутствии заправщика и водителя-оператора. При этом проверяется правильность оформления товарно-транспортной документации, исправность цистерны и ее сливных устройств, наличие паспорта качества на принимаемый нефтепродукт. При выявлении недостатков вызывают представителей нефтебазы, а неисправные автоцистерны не допускают к сливу.

8. Реализация нефтепродуктов.⁴

Результаты и обсуждения

Таким образом, в ООО «Татнефть-АЗС Центр» применяется достаточно широкий и разнообразный спектр инструментов Бережливого производства: кайдзен-предложения, 5С, стандартизация, *TPM*, визуализация, *SFM* – визуальный менеджмент, карты потока создания ценности. Инструменты различаются как по времени и продолжительности внедрения, так и по их эффективности. Этапы и последовательность внедрения представлены в табл. 8.

Таблица 8

Этапы и последовательность внедрения инструментов Бережливого производства в ООО

«Татнефть-АЗС Центр» (предложено авторами)

Этап	Период	Инструмент, действия	Цель	Формализация
Уровень рабочего места и производственного участка по всей разветвленной филиальной сети				
1	2013-2014	Обучение на базе ПАО «КамАЗ»	Осведомленность и вовлечение персонала	«Положение о системе непрерывного совершенствования производственной системы ООО «Татнефть-АЗС Центр»
		Создание постоянно действующих рабочих группы		
		Система кайдзен-предложений		
		Внедрение 5С на рабочих местах		
Уровень производственного процесса по всей разветвленной филиальной сети				
2	2015-2016	Стандартизация (СОК)	Сокращение длительности	Стандартизированные операционные карты (СОК)

⁴ Основные показатели деятельности ООО «Татнефть-АЗС Центр» в сравнении с предыдущим годом (с 2015 г. по 2017 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tatneft.ru/o-kompanii/obshchaya-informatsiya/osnovnie-pokazateli-deyatelnosti-kompanii/?lang=ru>

			производственных процессов и операций	по процессам и операциям
3		ТРМ или всеобщий уход за оборудованием	Достижение совершенного производства без поломок, остановок, медленного хода, брака и несчастных случаев.	Визуальные пособия ТРМ по обслуживанию оборудования (по видам), Чек-лист по обслуживанию оборудования (по видам),
Уровень управления процессами, бизнес-единицами и филиалами по всей разветвленной сети				
4	2017-2018	Визуализация, управление процессами из места создания ценности SFM (Shop Floor Management - SFM)	Информирование и контроль, идентификация и отображение местонахождения предметов; наличие полноценного инфоцентра	Стандарт по SFM – управление процессами из мест создания ценности в РСС ООО «Татнефть-АЗС Центр»
5		Создание Карт потока создания ценности	Выявление непроизводительных затрат и процессов	Схематичные Карты потока создания ценности по видам процессов и реализуемых продуктов

Как видно из таблицы, базовая цель «Осведомленность и вовлечение персонала» проходит красной нитью по всем этапам через усиление информирования персонала и полную формализацию проводимых изменений, назначения ответственных на каждом уровне: от оператора АЗС до руководителя филиала. Следует отметить, что инструменты Бережливого производства в анализируемом периоде применяются почти исключительно к производственным процессам и не затрагивают процессы управления и принятия управленческих решений. Следовательно, считаем, что дальнейшее развитие концепции должно проходить уже уровнем выше – в организации управленческой деятельности филиала и Головной компании, начиная с инструмента «Бережливый офис», что, потребует дополнительного обучения управленческого персонала.[13,с.58]

Выводы

Таким образом, в рамках адаптации принципов Бережливого производства к рознично-сбытовой сети нефтепродуктов ООО «Татнефть-АЗС Центр» первичными факторами являются отраслевая и организационная специфика. Организационная специфика определяется ПАО «Татнефть» согласно Стратегии – 2030 – удвоение капитализации с 2015 года к 2030 году. Для рознично-сбытовой сети нефтепродуктов шаблон выявления отраслевой специфики функционирования предприятия несколько видоизменяется, так как теряет свою актуальность информация о каналах сбыта, базовая активность не имеет вариаций и разнообразия в подходах в силу консервативности реализуемого продукта, актуализируется понятие концепта торговой марки [14,спис15]. Объединение отраслевой и организационной специфик функционирования ООО «Татнефть-АЗС Центр» позволяет определить и акцентировать базовые особенности и недостатки функционирования с целью адаптации принципов Бережливого производства и дальнейшего расширения применения его инструментов на всех уровнях организации и управления компании.

Литература

1. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Ахметов Т.Р. Оценка эффективности реализации программ энергосбережения. Проблемы энергосбережения в теплоснабжении // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 9-10. С. 12-21.
2. Дыганова Р.Р. Адаптация зарубежного опыта рынка мобильных приложений // Современные тенденции развития образования, науки и технологий. 3 Международная научно-практическая конференция. М.:2018. С. 114-117.
3. Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р. Актуальные вопросы повышения энергоэффективности теплоснабжающих организаций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11-12. С. 108-113.
4. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г. Анализ и оценка эффективности региональных программ энергосбережения (на примере Приволжского федерального округа // Казанский экономический вестник. 2015. № 3 (17). С.123-133.
5. Фомичев С.К., Скрыбина Н.И. Реализация Лин-программ в России // Генеральный директор. Управление промышленным предприятием. 2015. № 9. С. 68-70.

6. Мухаметова Л.Р. Перспективы повышения энергоэффективности теплоснабжающих организаций // Материалы докладов 11 Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» 23-25 марта 2016 г.: Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. 312 с.
7. Womack J., Jones D. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation / М.: Alpina Publisher, 2018. 472 p.
8. Masaaki I. Kaizen: the Key To Japan's Competitive Success . 3rd ed. М.: Alpina Business Books, 2014 .274 p.
9. Документы предприятия [Электронный ресурс]. <https://www.tatneft.ru/aktsioneram-i-investoram/vnutrennie-dokumenty-obshchestva?lang=ru> Режим доступа: (дата обращения 15.02.2019).
10. Голяков С.М. Современные производственные системы предприятий: Сборник научных статей «Проблемы взаимодействия хозяйствующих субъектов реального сектора экономики России». – СПб.: Институт бизнеса и права, 2017.
11. Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р., Богданов А.Н., Багаутдинова Л.А. Теоретические основы технико-экономического обоснования мероприятий по энергосбережению // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2013. № 3 (18). С. 26-37.
12. Shigeo Shingo. THE STUDY OF THE TOYOTA PRODUCTION SYSTEM From an Industrial Engineering Viewpoint / Shingo Shigeo. М: ICSI, 2014. 353 p. Accessed to: 13.02.2019. p. 57
13. Taiichi Ohno. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. М: ICSI Publishing House, 2015. 135 p.
14. Kagan G.L., Mukhametova L.R., Velsovskij A.Y. A method for construction of an energy-efficient ice floating pier in the Arctic using hardened ice (2020) E3S Web of Conferences, 178.
15. Larchenko L.V., Kolesnikov R.A., Mukhametova L. Russian oil and gas industry as a sphere of international interests and economic cooperation - (2020) E3S Web of Conferences, 161.

Авторы публикации

Мухаметова Лилия Рафаэлевна – канд. экон. наук, доцент кафедры Экономики и организации производства, Казанский государственный энергетический университет.

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, заведующая кафедрой Экономики и организации производства, Казанский государственный энергетический университет.

Зарипова Дания Анасовна – д-р экон. наук, профессор кафедры Экономики и организации производства, Казанский государственный энергетический университет.

Нурисламова Аделя Раилевна – магистрант, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Mukhametova LR, Akhmetova IG, Akhmetov TR. Ocenka effektivnosti realizacii programm energosberezheniya. Problemy energosberezheniya v teplosnabzhenii. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2015;9-10:12-21
2. Dyganova RR. Adaptation of foreign experience of the mobile applications market. Modern trends in the development of education, science and technology. 3 International Scientific and Practical Conference. М.: 2018 .pp. 114-117.
3. Akhmetova IG, Mukhametova LR. Aktual'nye voprosy povysheniya energoeffektivnosti teplosnabzhayushchih organizacij. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2015;11-12:108-113.
4. Mukhametova LR, Akhmetova I.G. Analysis and evaluation of the effectiveness of regional energy conservation programs (on the example of the Volga Federal District). *Kazanskij ekonomicheskij vestnik*. 2015;3(17):123-133.
5. Fomichev SK, Skryabina NI. Implementation of Lean programs in Russia. General Director. *Industrial enterprise management*. 2015;9:68-70.
6. Mukhametova LR. Prospects for improving the energy efficiency of heat supply organizations. Proceedings of the 11th of International Youth Scientific Conference "Tinchurin Readings" March 23-25, 2016: Kazan: Kazan. state energ. un-t, 2016.12 p.
7. Womack J., Jones D. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. М.: Alpina Publisher, 2018. 472 p.
8. Masaaki I. Kaizen: the Key To Japan's Competitive Success 3rd ed. М.: Alpina Business Books, 2014 . 274 p.

9. Enterprise documents [Electronic resource]. <https://www.tatneft.ru/aktsioneram-i-investoram/vnutrennie-dokumenti-obshchestva?lang=ru>. Accessed to: 15.02.2019.
10. Golyakov SM. Modern production systems of enterprises: *Collection of scientific articles Problems of interaction of economic entities in the real sector of the Russian economy*. SPb.: Institute of Business and Law, 2017.
11. Akhmetova IG, Mukhametova LR, Bogdanov AN, et al. Theoretical foundations of the feasibility study of energy saving measures. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2013;3 (18):26-37.
12. Shigeo Shingo. *THE STUDY OF THE TOYOTA PRODUCTION SYSTEM From an Industrial Engineering Viewpoint*. M: ICSI, 2014. 353 p. Accessed to: 13.02.2019. P. 57
13. Taiichi Ohno. *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. M: ICSI Publishing House, 2015. 135 p.
14. Kagan GL, Mukhametova LR, Velsovskij AY. *A method for construction of an energy-efficient ice floating pier in the Arctic using hardened ice* - (2020) E3S Web of Conferences, 178.
15. Larchenko LV, Kolesnikov RA, Mukhametova L. *Russian oil and gas industry as a sphere of international interests and economic cooperation* (2020) E3S Web of Conferences, 161.

Authors of the publication

Liliya R. Mukhametova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Denmark A. Zaripova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Adelya R. Nurislamova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Получено

09 ноября 2020г.

Отредактировано

25 декабря 2020г.

Принято

25 декабря 2020г.

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров

Институт систем энергетики им. Мелентьева, Иркутск, Россия

mayorovgs@isem.irk.ru

Резюме: В настоящее время управление развитием и функционированием энергетическими системами происходит отдельно по локальным системам и задачам. Традиционно рассматриваемые энергетические системы объединяют крупные энергоисточники, такие как гидро-, теплоэлектростанции, теплоэлектроцентрали, котельные и распределенные по большой территории электрические и трубопроводные сети. Новые тенденции в энергетике обуславливают новую ЦЕЛЬ. Необходимость пересмотра принципов построения энергетических систем и создания интегрированных энергетических систем. Объединение существующих энергетических систем в единую интегрированную систему с множеством взаимосвязанных и координирующихся элементов может способствовать реализации новых функциональных возможностей, применению более совершенных технологий в эксплуатации и активному участию потребителей с распределенной генерацией в процессе энергоснабжения. МЕТОДЫ. Для исследования интегрированных энергетических систем предлагается использовать мультиагентный подход, который является одним из перспективных направлений исследования сложных систем. Данный подход используется во многих предметных областях для исследования систем, включающих большое количество элементов со сложным поведением. К подобным системам относятся интегрированные энергетических системы, моделирование и анализ которых на базе мультиагентного подхода формируется множеством взаимосвязанных агентов, обменивающихся друг с другом различными данными. РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам исследований предложена активная структура мультиагентной системы для расчета и оптимизации интегрированных энергетических систем и, учитывающая их основные особенности и свойства, в рамках которой определены агенты мультиагентной системы, их цели и задачи. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На базе этой структуры разработана модель, позволяющая моделировать интегрированные энергетические системы. Проведенные эксперименты с помощью разработанной модели, показали ее работоспособность, практическую применимость и перспективность для дальнейшего развития.

Ключевые слова: мультиагентные системы, интегрированные энергетические системы, мультиагентный подход, моделирование систем энергетики, электроэнергия, тепловая энергия.

Благодарности: Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках проекта государственного задания 17.4.1 (рег. № АААА-А17-117030310432-9) фундаментальных исследований СО РАН.

Для цитирования: Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Майоров Г.С. Применение мультиагентного подхода для моделирования интегрированных энергетических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 29-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42.

APPLICATION OF THE MULTIAGENT APPROACH FOR MODELING INTEGRATED ENERGY SYSTEMS

VA. Stennikov, EA. Barakhtenko, GS. Mayorov

Melentiev energy systems institute, Irkutsk, Russia
mayorovgs@isem.irk.ru

Abstract: Currently, operation control and expansion planning of energy systems occurs separately for local systems and tasks. Traditionally, the considered energy systems unite large energy sources, such as hydro, thermal power plants, combined heat and power plants, boiler plants and electric and pipeline networks distributed over a large area. New trends in the energy sector necessitate a revision of the principles of the construction of energy systems and creating integrated energy systems. **THE PURPOSE.** Combining existing energy systems into a single integrated system with many interconnected and coordinating elements can contribute to the implementation of new functionalities, the use of more advanced technologies in operation and the active participation of consumers with distributed generation in the energy supply process. **METHODS.** To study integrated energy supply systems, it is proposed to use a multiagent approach, which is one of the promising areas for the study of complex systems. This approach is used in many subject areas to study systems involving a large number of elements with complex behavior. Such systems include integrated energy systems, the modeling and analysis of which on the basis of a multiagent approach is formed by a multitude of interconnected agents that exchange various data with each other. **RESULTS.** Based on the research results, the active structure of a multiagent system is proposed for the calculation and optimization of integrated energy systems and, taking into account their main features and properties, in the framework of which the agents of the multiagent system, their goals and objectives are determined. **CONCLUSIONS.** Based on this structure, a model has been developed that allows modeling integrated energy systems. The experiments carried out using the developed model showed its efficiency, practical applicability and prospects for further development.

Keywords: multiagent systems; integrated energy systems; multiagent approach; energy systems modeling; electrical energy; thermal energy.

Acknowledgments: The research was carried out under State Assignment, Project 17.4.1 (reg. no. AAAA-A17-117030310432-9) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Stennikov VA, Barakhtenko EA, Mayorov GS. Application of the multiagent approach for modeling integrated energy systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):29-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42.

Введение

Энергетика развитых стран мира переживает в настоящее время смену технологической парадигмы. Она предполагает повышение роли потребителей, снижение приоритета централизованного управления и поиск компромиссных решений. С увеличением количественного состава технологий (отопление, кондиционирование, электричество, современное аудио- и видеооборудование, системы доставки информации и многое другое) усиливается взаимосвязь отдельных систем, растет объем обмениваемой информацией, усложняется управление системами. Для преодоления этих проблем в передовых странах была предложена идея интеграции и интеллектуализации энергетических систем и уже начался процесс их реализации в виде пилотных проектов [1-2]. Интегрированные энергетические системы (ИЭС) развиваются в ряде Европейских стран, таких как: Германия, Дания, Нидерланды, Финляндия, Франция, Швеция [3], а также Китай [4]. Эти страны определили полигоны в виде отдельных городов, где реализуются пилотные проекты ИЭС. Наиболее масштабным является проект «Объединенные эффективные крупномасштабные интегрированные городские системы» по созданию интеллектуальных систем электро-, тепло/хладоснабжения, который реализуется в пяти крупных городах Европы: Гетеборге, Женеве, Кельне, Лондоне, Роттердаме.

Объединение систем разного уровня как по типу используемой энергии, так и по территориальному признаку в единую интегрированную систему с большим количеством

координирующихся между собой элементов может обеспечить реализацию новых функциональных возможностей недоступных при раздельном управлении, повысить надежность всей системы, позволит применить более совершенные технологии эксплуатации и обеспечит возможность потребителям с распределенной генерацией активно участвовать в процессе своего энергоснабжения. Для исследования ИЭС предлагается использовать мультиагентный подход, который является одним из перспективных направлений исследования сложных систем [5-6].

Особенности интеграции и мультиагентного подхода

Основными целями технологической интеграции и интеллектуализации энергетических систем являются достижение более высокого уровня управления с целью обеспечения высокого уровня комфорта в жилых, общественных и производственных зданиях, обеспечения экономичности энергоснабжения, снижения негативного воздействия на окружающую среду [1-2,7]. Интеграция систем в единую метасистему повышает уровень ее управляемости, при этом увеличивается количество и интенсивность взаимосвязей и взаимодействия между отдельными элементами.

Основные принципы создания ИЭС [1-2,7]:

- Переход от функционирования нескольких разрозненных систем к общей метасистеме с единым управлением.
- Эмерджентность, выраженная в приобретении метасистемой новых свойств, не присущих ее элементам.
- Взаиморезервирование систем в процессе их функционирования.
- Переход от вертикально-подчиненного управления к мультиагентному управлению (от вертикали к горизонтали), когда каждая система, ее элемент, имеет своего агента, который принимает воздействие от внешней среды и осуществляет реакцию на это воздействие. Решения принимаются и реализуются независимыми центрами.
- Интеграция управления режимами ИЭС посредством сетевой (распределенной) координации мониторинга.

На рис. 1 показана традиционная иерархическая схема построения энергетической системы и схема построения интеллектуальной ИЭС.

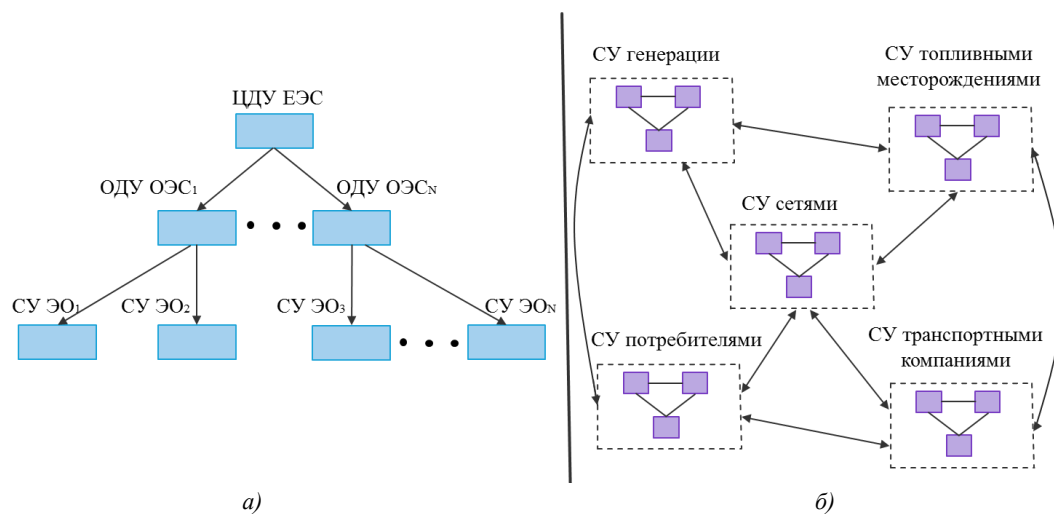


Рис. 1. Схемы построения энергетических систем:

а) традиционная иерархическая схема построения энергетической системы: ЦДУ ЕЭС – центральное диспетчерское управление единой энергетической системы; ОДУ ОЭС – оперативно-диспетчерское управление объединенных энергосистем; СУ ЭО – системы управления энергообъединений; б) схема построения интеллектуальной интегрированной энергетической системы: СУ – системы управления

Представленные на рис. 1 традиционная схема (а) построения энергетической системы имеет вертикально-интегрированную систему управления энергетикой, интегрированная (б) основана на горизонтальной схеме управления.

Мультиагентный подход находит широкое применение в таких областях как распределенное решение сложных задач, совмещенное проектирование изделий, реинжиниринг бизнеса и построение виртуальных предприятий, имитационное моделирование интегрированных производственных систем и электронная торговля [8-10]. Принципиальная структура мультиагентной системы (МАС) представлена на рис. 2. Для моделирования и исследования ИЭС мультиагентный подход представляет наибольший

интерес, т.к. он позволяет наиболее точно и детально исследовать механизмы взаимодействия и координации элементов ИЭС.

В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или как элемент искусственного интеллекта. Суть мультиагентных технологий заключается в новом методе решения задач. В отличие от классического способа, когда осуществляется поиск некоторого четко определенного (детерминированного) алгоритма, позволяющего найти наилучшее решение проблемы, в мультиагентных технологиях решение получается в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих программных модулей (агентов) [11-12].

Под агентом понимается любая сущность, которая находится в некоторой среде, воспринимает ее посредством сенсоров, получая данные, которые отражают события, происходящие в среде, интерпретирует эти данные и действует на неё посредством различных воздействий. Таким образом, определяются четыре исходных фактора, образующих агента: среда, восприятие, интерпретация, действие [12-13].

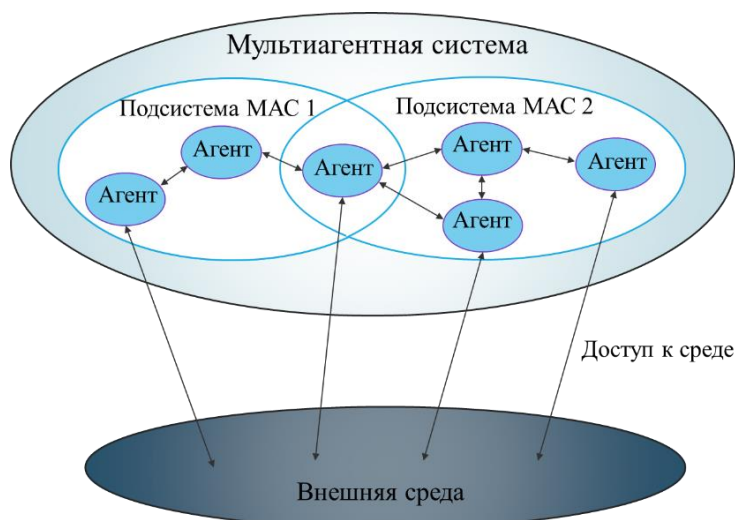


Рис. 2. Принципиальная структура мультиагентной системы

Мультиагентный подход для исследования ИЭС предполагает решение следующих групп задач:

- создание систем сбора технологической информации, которые предназначены для накопления необходимых данных об ИЭС и для формирования решения по управлению функционированием и развитием системы на основе полученной информации;
- создание структурированной информационно-технологической среды, т.е. создание единой информационной среды для ИЭС, в которой каждый элемент имеет свои задачи, функции, ограничения и связи с другими элементами;
- разработку программного обеспечения для быстрой обработки данных в ИЭС, чтобы на основе полученной информации система могла выработать наиболее оптимальное решение;
- реализацию быстрого технологического управления ИЭС, т.е. система должна отличаться гибкостью и маневренностью, быстро реагировать на сложные и аварийные ситуации.

Структура разрабатываемой мультиагентной системы (MAC) отражает особенности схемы построения интеллектуальной ИЭС. Она включает вертикальные и горизонтальные связи между элементами системы, в отличие от традиционной иерархической схемы, где взаимодействие происходит вертикально, строго сверху вниз. В то же время в разрабатываемой MAC существует общий координирующий орган, который содержит информацию о всей системе и отслеживает ее параметры, чтобы они не выходили за заданные ограничения.

Структура мультиагентных систем для исследования интегрированных энергетических систем

Структура MAC, принятая для исследования ИЭС, представлена на рис. 3. Все объекты в рассматриваемой ИЭС делятся на потребителей, сети и источники энергии, каждый объект имеет своего агента, отражающего его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Кроме того, существует общий агент (сетевой агент), принимающий заявки на энергию от потребителей

и пересылающий их источникам энергии и сетям, имеющим возможности участвовать в энергоснабжении потребителя. Сетевой агент имеет ограничения и отражает нормативные параметры всей ИЭС и при необходимости может отдать соответствующие команды для поддержания нормального режима работы ИЭС.

Взаимодействие агентов в ИЭС выполняется через прямые и обратные связи между ними. Агенты-потребителей формируют заявки на необходимое количество энергии и отправляют их сетевому агенту. В свою очередь сетевой агент распределяет эти заявки между соответствующими агентами-источников и агентами-сетей, которые могут участвовать в снабжении потребителей. Получив заявки на энергию, агенты-источников и агенты-сетей проверяют необходимые условия и ограничения (у каждого объекта системы есть свои ограничения, например, ограничения по генерируемой мощности или ограничения по пропускной способности сети), затем они начинают взаимодействовать между собой и сетевым агентом (отправляя сообщения и параметры) и вырабатывают наиболее оптимальное решение по снабжению потребителей. В случае, если найти оптимальное решение не получается, то сетевой агент может сформировать новый запрос и перераспределить один тип энергии путем преобразования его в другой, например, если для покрытия спроса недостаточно производимой электрической энергии, то можно через специально задействованные резервные генераторы (работающие на газе или использующие энергию пара) получить необходимое количество электроэнергии и наоборот, используя электроэнергию, можно через специальные электрические бойлеры получить недостающую тепловую энергию. В табл. 1 более подробно расписаны цели, задачи и ограничения агентов каждого типа.

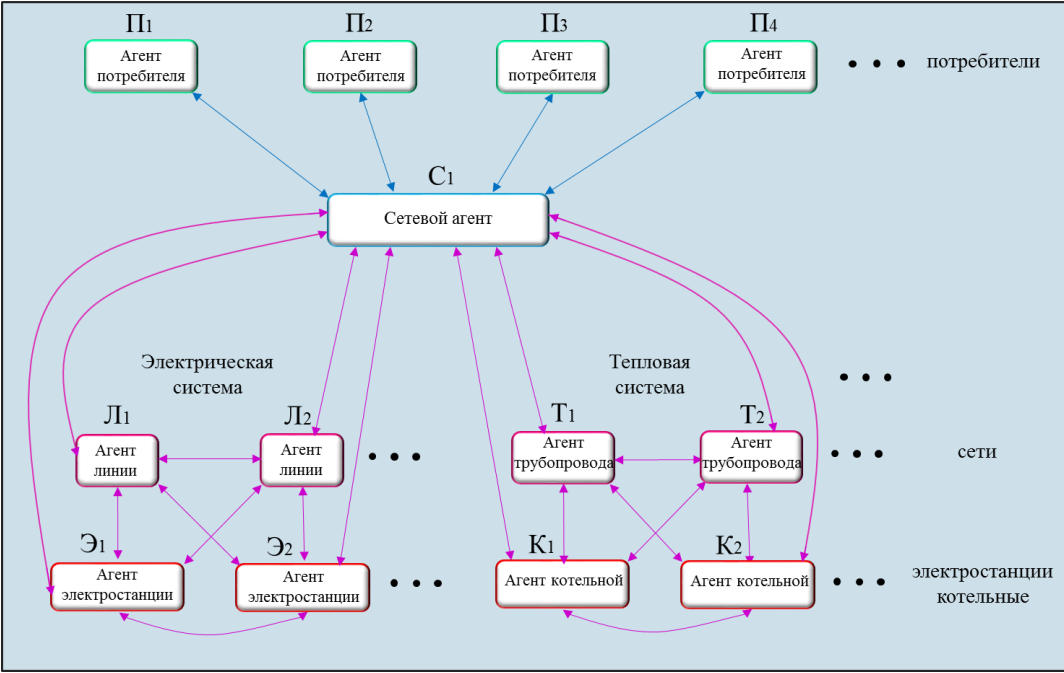


Рис. 3. Структура и взаимодействие агентов в интегрированной энергетической системе

Таблица 1

Агенты, их цели и задачи		
Агенты	Цели и задачи	Ограничения
1. Агент-потребителя	Обеспечивает бесперебойную работу оборудования потребителя. Формирует необходимый график нагрузок и отправляет заявки сетевому агенту.	Инфраструктурные ограничения, требования правил безопасности
2. Сетевой агент	Получает заявки на необходимое количество энергии с заданными параметрами от агентов потребителей и распределяет их между агентами источников энергии и сетей, принимает участие при формировании решений задач по снабжению потребителей, при необходимости может создать запрос и перераспределить энергию как в нормальных так и в аварийных ситуациях	Возможности информационных каналов связи, наличие каналов связи с другими агентами, ограничения и нормативные параметры всей ИЭС, требования правил безопасности
3. Агент-источника	Получает заявки на энергию от сетевого агента, оценивает возможность выполнения данной	Возможности информационных каналов

	заявки, осуществляет обмен данными с другими агентами, обеспечивает выработку необходимого количества энергии, нужных параметров на имеющемся генерирующем оборудовании	связи, наличие каналов связи с другими агентами, возможности генерирующего оборудования, требования правил безопасности
4. Агент-сетей	Получает заявки на энергию от сетевого агента, оценивает возможность выполнения данной заявки, осуществляет обмен данными с другими агентами, обеспечивает доставку необходимого количества энергии потребителю, нужных параметров.	Возможности информационных каналов связи, наличие каналов связи с другими агентами, пропускная способность сетей, требования правил безопасности

Мультиагентная модель интегрированной энергетической системы

На основании вышеизложенной структуры МАС разработана модель ИЭС. Эта модель отражает взаимодействие агентов двух технологических систем (электрической и тепловой). Преднамеренное упрощение объекта исследования сделано для наглядного представления работы модели. Дальнейшее ее развитие связано с включением в нее моделей других энергетических систем (например, холодоснабжения, газоснабжения), а также расширение функциональных возможностей.

На рис. 4 приведена укрупненная схема ИЭС, состоящая из двух потребителей (завод и фабрика), двух электрических станций, одной котельной, четырех ЛЭП и двух тепловых магистралей, также у второго потребителя установлен электрический бойлер. Такая схема позволит исследовать модель поведения агентов и взаимодействие между ними. Согласно разработанной структуре агентов и их взаимодействию между собой в рамках предложенной модели осуществляется поиск решения по оптимальному энергоснабжению потребителей.

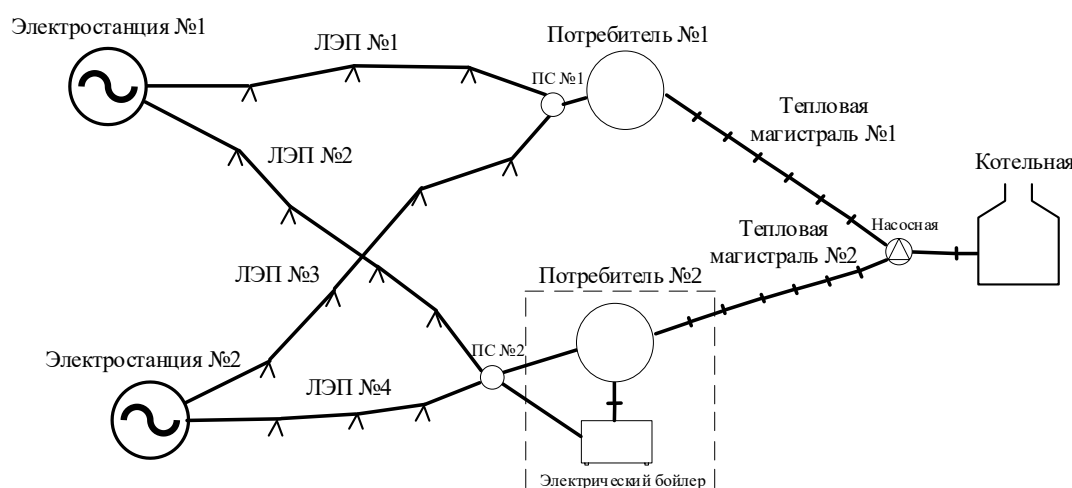


Рис. 4. Схема интегрированной энергетической системы

Описание поведения и взаимодействия агентов в формируемой модели, осуществляется через диаграммы состояний (рис. 5). Диаграмма состояний представляет собой отличительные состояния агента, выполняющего различные действия при происхождении каких-то событий (рис. 5.а), соединенных переходами (рис. 5.б), которые срабатывают в результате получения сообщения, заданного времени, выполнения заданного логического условия и т.д. Срабатывание перехода приводит к смене состояний [14-15].

Диаграмма состояний сетевого агента приведенная на рис. 5.б отражает процесс взаимодействия агентов в системе. После получения заявки от потребителя на энергию (1), сетевой агент отправляет эту заявку соответствующим источникам энергии и сетям (2), которые связаны с данным потребителем и могут передать ему энергию. В свою очередь все потенциальные источники энергии и сети, получив заявку, проверяют необходимые условия и отправляют сетевому агенту ответ о возможности своего участия в снабжении потребителя (при этом причины отказа могут быть различными, загруженность, нахождении в аварии и т.д.). Получив ответы от агентов-источников и агентов-сетей (3), сетевой агент проверяет необходимые ограничения и определяет возможно ли снабжение потребителя или нет (4). Если снабжение потребителя возможно (5), то сетевой агент формирует запрос на стоимость энергии агентам-источников (6), затем сравнивает

полученные цены и выбирает наиболее выгодный вариант (7). После этого он отправляет нужным источникам энергии согласие на снабжение, а остальным отказ и оповещает об этом потребителя, что его заявка на энергию выполнена (8). После отправки сообщений сетевой агент переходит в состояние ожидания заявок (9). Если снабжение потребителя невозможно, то сетевой агент переходит в состояние отклонения заявки (10) и отправляет потребителю отказ (11). После отправки сообщений он переходит в состояние ожидания заявок (12).

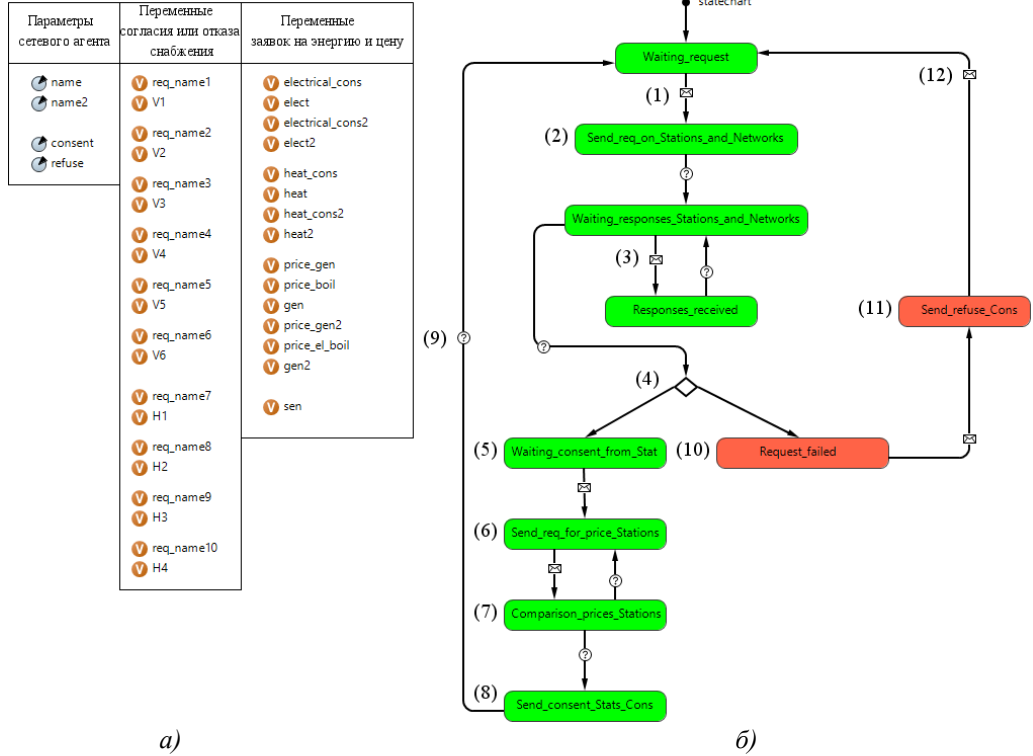


Рис. 5. Диаграмма состояний сетевого агента

Математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения потребителей

Математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения потребителей, заключается в минимизации затрат на энергоснабжения потребителей с учетом выполнения технологических ограничений и условий. Она включает распределение нагрузки между источниками и поиск оптимальных путей снабжения потребителей энергией от этих источников. Заданными являются: временной период $\tau \in [0; \Theta]$; источники электроэнергии G ; источники тепловой энергии B ; потребители электроэнергии K ; потребители тепловой энергии H ; объем спроса на электроэнергию P_τ^Θ , на тепловую энергию Q_τ^T ; расстояние l_g^Θ от потребителей до источников электроэнергии $g \in G$; тоже для тепловой энергии l_b^T , $b \in B$.

В результате решения поставленной задачи необходимо определить наиболее выгодный для потребителя путь снабжения электроэнергией и тепловой энергией $M = (M_1, \dots, M_{g,b})$, состав источников энергии $N = (N_1, \dots, N_{g,b})$, которые будут участвовать в снабжении потребителя и объем вырабатываемой тепловой $Q_\tau = (Q_{1,\tau}, \dots, Q_{b,\tau})$ и электрической $P_\tau = (P_{1,\tau}, \dots, P_{g,\tau})$ энергии.

Требуется минимизировать функцию общих затрат на снабжение потребителей энергией, имеющий вид:

$$Z(M, N, Q_\tau, P_\tau) = \sum_{\tau=0}^{\Theta} \left(\sum_{g=1}^G \eta_{g,\tau} C_{g,\tau}^\Theta + \sum_{b=1}^B \rho_{b,\tau} C_{b,\tau}^T \right) \longrightarrow \min,$$

$$\eta_{g,\tau} = (\eta_{1,\tau}, \dots, \eta_{G,\tau}), \quad \eta_{g,\tau} \in \{0,1\}, \quad \rho_{b,\tau} = (\rho_{1,\tau}, \dots, \rho_{B,\tau}), \quad \rho_{b,\tau} \in \{0,1\},$$

$$M = (M_1, \dots, M_{g,b}), M \in R^{g,b}, N = (N_1, \dots, N_{g,b}), \quad N \in R^{g,b}, \quad Q_\tau = (Q_{1,\tau}, \dots, Q_{b,\tau}),$$

$$Q_\tau \in R^b, P_\tau = (P_{1,\tau}, \dots, P_{g,\tau}), P_\tau \in R^g, \tau \in [0; \Theta],$$

где $\eta_{g,\tau}$ – состояние g -го источника электроэнергии (0 – не задействован, 1 – задействован);

$\rho_{b,\tau}$ – состояние b -го источника тепла (0 – не задействован, 1 – задействован);

$C_{g,\tau}^\Delta$ – суммарные затраты на электроснабжение потребителей от g -го источника электроэнергии; $C_{b,\tau}^T$ – суммарные затраты на теплоснабжение потребителей от b -го источника тепла;

При решении этой задачи должны выполняться следующие условия и ограничения: производство тепловой энергии:

$$Q_{\min} \leq Q_{b,\tau} \leq Q_{\max}, Q \geq 0, b \in B;$$

производство электроэнергии:

$$P_{\min} \leq P_{g,\tau} \leq P_{\max}, P \geq 0, g \in G;$$

ограничение пропускной способности пути:

$$L_{\min} \leq L_{g,b} \leq L_{\max}, L \geq 0, b \in B, g \in G;$$

баланс между вырабатываемой и потребляемой энергией:

$$\sum_{g=1}^G P_{g,\tau} = \sum_{k=1}^K P_\tau^\Delta; \sum_{b=1}^B Q_{b,\tau} = \sum_{h=1}^H Q_\tau^T, k \in K, h \in H;$$

Решение поставленной задачи оптимизации энергоснабжения потребителей выполняется с помощью применения мультиагентного подхода. Практическое его использование рассматривается на примере решения поставленной задачи для поиска оптимального энергоснабжения потребителей ИЭС схема, которой приведена на рис. 4. Приведенный далее анализ вычислительного процесса позволит оценить правильность выполнения своих функций агентами, корректность передачи данных по системе, формирование и работу логических цепочек.

Практическое применение мультиагентного подхода исследования интегрированной энергетической системы

Для простоты понимания алгоритмического процесса выделим два отличающихся исходными условиями варианта вычислительного эксперимента.

Первый вычислительный эксперимент

В первом эксперименте обе электростанции, котельная и электрический бойлер находятся в работоспособном состоянии и могут выработать заданное количество энергии, электрические и тепловые сети также находятся в рабочем состоянии и могут передать необходимое количество энергии.

Исходные данные:

$P_{g1,\tau} = 250$ МВт – номинальная мощность электростанции №1;

$P_{g2,\tau} = 220$ МВт – номинальная мощность электростанции №2;

$Q_{b1,\tau} = 300$ Гкал/ч – номинальная мощность котельной;

$Q_{b2,\tau} = 60$ Гкал/ч – номинальная мощность электрического бойлера;

$C_{g1}^\Delta = 1100$ руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №1;

$C_{g2}^\Delta = 1300$ руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №2;

$C_{b1}^T = 1200$ руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию котельной;

$C_{b2}^T = 1500$ руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию электрического бойлера;

$P_{1,\tau}^\Delta = 60$ МВт – электрическая нагрузка потребителя №1;

$Q_{1,\tau}^T = 100$ Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №1;
 $P_{2,\tau}^{\mathcal{E}} = 50$ МВт – электрическая нагрузка потребителя №2;
 $Q_{2,\tau}^T = 60$ Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №2;
 $P_{3,\tau}^{\mathcal{E}} = 70$ МВт – нагрузка электрического бойлера;
 $L_{g1} = 80$ МВт – пропускная способность ЛЭП №1;
 $L_{g2} = 130$ МВт – пропускная способность ЛЭП №2;
 $L_{g3} = 70$ МВт – пропускная способность ЛЭП №3;
 $L_{g4} = 140$ МВт – пропускная способность ЛЭП №4;
 $L_{b1} = 150$ Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №1;
 $L_{b2} = 100$ Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №2.

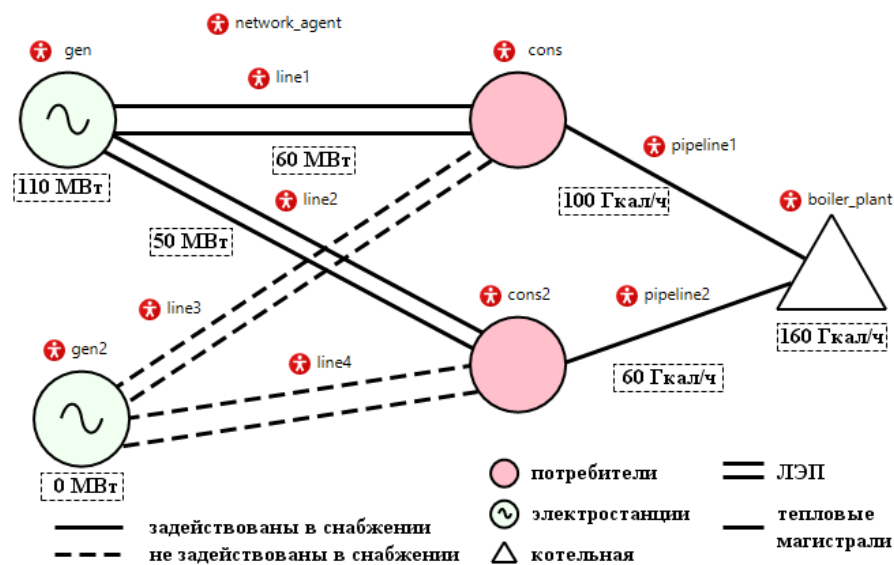


Рис. 6. Схема мультиагентной модели ИЭС для первого эксперимента

В соответствии с заданными условиями формируется вычислительный процесс поиска решения по энергоснабжению потребителей (рис. 6). Агенты-потребителей подготавливают заявки на энергию на сутки вперед, при этом сначала на тепловую энергию. Первый потребитель формирует заявку на 100 Гкал/ч, а второй потребитель на 60 Гкал/ч, затем они отправляют их сетевому агенту, а он в свою очередь перенаправляет данные заявки котельной и электрическому бойлеру, расположенному у второго потребителя, и тепловым сетям. Далее осуществляется поиск решения, путем взаимодействия агентов тепловых сетей и источников тепловой энергии между собой. В результате интегрированная система получает решение, согласно которому снабжение потребителей тепловой энергией будет выполнять котельная, поскольку она обладает необходимым запасом мощности и более низкой стоимостью тепловой энергии по сравнению с электрическим бойлером. Для доставки тепловой энергии будут соответственно задействованы тепловые магистрали № 1 и 2 (рис. 6). После расчета теплоснабжения потребителей, происходит формирование заявок на электроэнергию: первый потребитель формирует заявку на 60 МВт, второй потребитель на 50 МВт. Следует учитывать, что у второго потребителя к исходной нагрузке может прибавиться нагрузка электрического бойлера, но в данном эксперименте это не требуется, поскольку электрический бойлер не участвует в снабжении. Сформированные заявки отправляются сетевому агенту, а он в свою очередь отправляет их агентам двух электростанций и электрических сетей. Как и в случае снабжения тепловой энергией, происходит поиск решения путем взаимодействия агентов электрических сетей и электростанций. В результате интегрированная система получает решение, согласно которому снабжение потребителей будет осуществлять первая электростанция, поскольку она обладает

необходимым запасом мощности и стоимостью электроэнергии более низкой чем у второй электростанции. Для доставки электроэнергии соответственно, будут задействованы ЛЭП № 1 и 2 (рис. 6). Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения первого потребителя за сутки составила 4464000 руб., в том числе на электроэнергию 1584000 руб., на тепловую энергию 2880000 руб. Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения второго потребителя за сутки составила 3048000, в том числе на электроэнергию 1320000 руб., на тепловую энергию 1728000 руб.

Анализ поведения и взаимодействия агентов показал, что предложенная модель обеспечила получение решения в соответствии с поставленной задачей. Снабжение потребителей электроэнергией предлагается осуществлять от первой электростанции, а снабжение тепловой энергией от котельной. Логическая схема модели и агенты выполнили возложенную на них задачу, их цепочки взаимодействия правильно организовались, передача данных по системе производилась корректно, потребители получили необходимое количество энергии с заданными параметрами.

Второй вычислительный эксперимент

Во втором вычислительном эксперименте первая электростанция не сможет сгенерировать заданное количество электроэнергии (так как она уже загружена), а вторая электростанция обладает необходимой мощностью генерирующего оборудования и возможностью производства электроэнергии для выполнения заявки от потребителей. Помимо этого, количество тепловой энергии производимой котельной хватит для выполнения заявки только от первого потребителя, а снабжение второго потребителя тепловой энергией может осуществляться от электрического бойлера, установленного у данного потребителя. Электрические и тепловые сети находятся в рабочем состоянии и могут передать требуемое количество энергии.

Исходные данные:

$P_{g1,\tau} = 0$ МВт – номинальная мощность электростанции №1;

$P_{g2,\tau} = 220$ МВт – номинальная мощность электростанции №2;

$Q_{b1,\tau} = 100$ Гкал/ч – номинальная мощность котельной;

$Q_{b2,\tau} = 60$ Гкал/ч – номинальная мощность электрического бойлера;

$C_{g1}^{\mathcal{E}} = 1100$ руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №1;

$C_{g2}^{\mathcal{E}} = 1300$ руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №2;

$C_{b1}^T = 1200$ руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию котельной;

$C_{b2}^T = 1500$ руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию электрического бойлера;

$P_{1,\tau}^{\mathcal{E}} = 60$ МВт – электрическая нагрузка потребителя №1;

$Q_{1,\tau}^T = 100$ Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №1;

$P_{2,\tau}^{\mathcal{E}} = 50$ МВт – электрическая нагрузка потребителя №2;

$Q_{2,\tau}^T = 60$ Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №2;

$P_{3,\tau}^{\mathcal{E}} = 70$ МВт – нагрузка электрического бойлера;

$L_{g1} = 80$ МВт – пропускная способность ЛЭП №1;

$L_{g2} = 130$ МВт – пропускная способность ЛЭП №2;

$L_{g3} = 70$ МВт – пропускная способность ЛЭП №3;

$L_{g4} = 140$ МВт – пропускная способность ЛЭП №4;

$L_{b1} = 150$ Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №1;

$L_{b2} = 100$ Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №2.

В соответствии с заданными условиями выстраивается схема процесса поиска решения по энергоснабжению потребителей (рис. 7). Как и в первом эксперименте агенты потребителей формируют заявки на энергию на сутки вперед, сначала на тепловую энергию. При этом первый потребитель подготавливает заявку на 100 Гкал/ч, а второй

потребитель на 60 Гкал/ч. Затем они отправляются сетевому агенту, а он в свою очередь перенаправляет эти заявки котельной, электрическому бойлеру второго потребителя и тепловым сетям. Далее осуществляется поиск решения, путем взаимодействия агентов тепловых сетей и источников тепловой энергии между собой. В результате для заданной интегрированной системы было получено решение, согласно которому котельная обеспечивает тепловой энергией только первого потребителя, для чего будет задействована тепловая магистраль №1 (рис. 7). Для снабжения второго потребителя у котельной недостаточно тепловой мощности, поэтому снабжение второго потребителя тепловой энергией будет осуществляться от электрического бойлера. После расчета теплоснабжения потребителей, происходит формирование заявок на электроэнергию. Первый потребитель формирует заявку на 60 МВт, второй потребитель - на 120 МВт, т.е. на 70 МВт больше, поскольку к исходной электрической нагрузке второго потребителя прибавилась нагрузка электрического бойлера, так как в этом решении он участвует в процессе теплоснабжения. Затем сформированные заявки направляются сетевому агенту, а он в свою очередь переправляет их агентам двух электростанций и электрических сетей. Осуществляется поиск решения путем взаимодействия агентов электрических сетей и электростанций. В результате для интегрированной системы формируется решение, согласно которому снабжение потребителей будет осуществлять вторая электростанция, поскольку она обладает необходимой мощностью и более низкой стоимостью электроэнергии. Для доставки электроэнергии соответственно, будут задействованы ЛЭП № 3 и 4 (рис. 7). Первая электростанция загружена и не имеет необходимой мощности для выполнения заявок. Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения первого потребителя за сутки составила 4752000 руб., в том числе на электроэнергию 1872000 руб., на тепловую энергию 2880000 руб. Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения второго потребителя за сутки составила 3720000, в том числе на электроэнергию 1560000 руб. (без учета затрат на энергоснабжение электрического бойлера, которые включены в стоимость вырабатываемой им тепловой энергии), на тепловую энергию 2160000 руб.

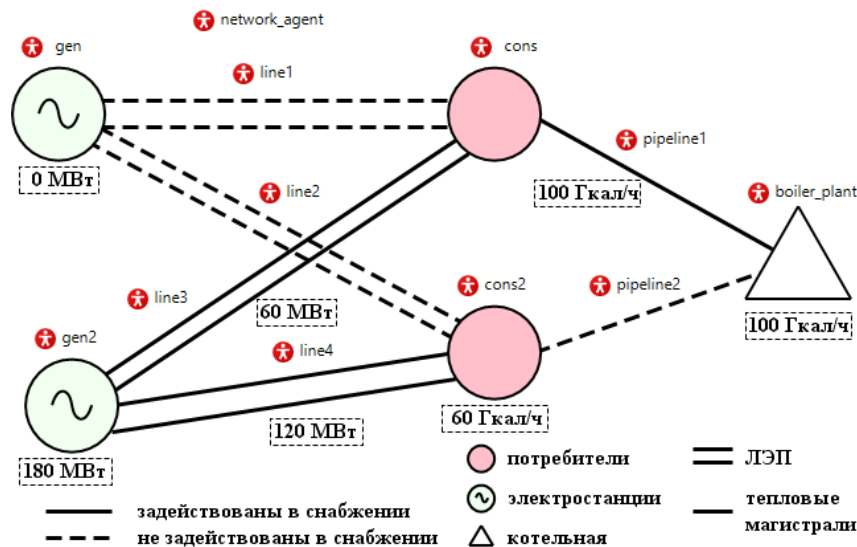


Рис. 7. Схема мультиагентной модели ИЭС для второго эксперимента

В соответствии с решением поставленной задачи снабжение потребителей электроэнергией будет осуществляться от второй электростанции, поскольку она имеет необходимую электрическую мощность и минимальную стоимость электроэнергии. Снабжение первого потребителя тепловой энергией будет производиться от котельной, а снабжение второго потребителя тепловой энергией - от электрического бойлера. Все агенты модели успешно выполнили свои функции, логические цепочки сформировались и отработали правильно, передача данных по системе проводилась корректно, потребители получили необходимое количество энергии, с заданными параметрами в соответствии с принятым критерием оптимальности.

Результаты

Поставленная задача оптимизации энергоснабжения потребителей решена с помощью мультиагентного подхода. Разработанная мультиагентная модель ИЭС обеспечила достижение ожидаемых целевых установок. В процессе исследований были

отработаны механизмы взаимодействия и координации агентов с учетом введенного критерия и ограничений. Проведены два эксперимента с помощью разработанной модели. В результате проведенных экспериментов определены оптимальные варианты снабжения потребителей и проанализирована работоспособность модели с учетом всех условий и ограничений.

Выводы

В настоящей статье рассмотрены тенденции формирования и основные принципы построения ИЭС. Сделана оценка возможности применения мультиагентного подхода к управлению ими. Проведенное исследование показало, что мультиагентный подход представляется актуальным и эффективным методом для моделирования и оптимизации ИЭС. На основании анализа принципов построения ИЭС разработана структура МАС для исследования этих систем, учитывающая ее особенности функционирования и взаимодействия объектов, определены основной состав и типы агентов МАС, их цели и задачи. Разработана мультиагентная модель ИЭС и на ее базе проведены вычислительные эксперименты, показывающие работоспособность предложенной модели.

В дальнейшем данная модель получит развитие в следующих направлениях: учет динамики процессов; включение дополнительных условий и ограничений на параметры режима работы ИЭС; взаимодействие нескольких ИЭС; совместное функционирование активных потребителей и централизованных источников для поддержания баланса в системе.

Теоретическая значимость предложенных разработок заключается в обосновании методов и принципов для моделирования интегрированных энергетических систем на основе мультиагентных технологий.

Практическая значимость исследований определяется разработкой программного прототипа МАС для исследования интегрированных энергетических систем и возможностью моделировать реальные схемы энергоснабжения на базе этого прототипа.

Литература

1. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V.1111. No.1.
2. Воропай Н.И., Стенников В.А., Сендеров С.М., и др. Интегрированные инфраструктурные энергетические системы регионального и межрегионального уровня // Энергетическая политика. 2015. № 3. С. 24-32.
3. René Verhoeven, Eric Willems, Virginie Harcouët-Menou, et al. Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling // Energy Procedia. 2014. 46. pp. 58-67.
4. Ran X., Zhou R., Yang Y., et al. The Multi-Objective Optimization Dispatch of Combined Cold Heat and Power Based on the Principle of Equal Emission // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, United States. 22-26 July 2012. pp. 1-5.
5. Amjad Anvari-Moghaddam, Ashkan Rahimi-Kian, Maryam S.Mirian, et al. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system // Applied Energy. 2017. V. 203. pp. 41-56.
6. Felix Bünnigab, Michael Wettera, Marcus Fuchsb, et al. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization // Applied Energy. 2018. V. 209. pp. 502-515.
7. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64-73.
8. Городецкий В.И., Скобелев П.О., Бухвалов О.Л. Промышленные применения многоагентных систем: прогнозы и реалии // Труды 18 Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: ООО «Офорт». 2016. С. 137-162.
9. Yi Ren, Dongming Fan, Qiang Feng, et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // Applied Energy. 2019. V. 249. pp. 46-57.
10. Negnevitsky M., Tomin N.V., Panasetsky D.A., et al. A neural multi-agent-based approach for preventing blackouts in power systems // 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2014; 6-8 March 2014; Angers, Loire Valley; France; Code 105589. 2014. pp.565-570.
11. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентной системы оценивания состояний электроэнергетических систем с использованием событийных моделей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Баумана. 2015. №9.

12. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. 1995. V.10. N2. pp.115-152.

13. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 5. С. 45-53.

14. Абрамов В.И., Кудинов А.Н., Евдокимов Д.С. Применение социального моделирования с использованием агент-ориентированного подхода в приложении к научно-техническому развитию, реализации НИОКР и поддержанию инновационного потенциала // Вестник ВГУИТ. 2019. Т.81. №3. С.339–357.

15. Маковеев В.Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. № 5. С. 272-289.

Авторы публикации

Стенников Валерий Алексеевич – чл.-корр. РАН, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: sva@isem.irk.ru.

Барахтенко Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru.

Майоров Глеб Сергеевич – аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: mayorovgs@isem.irk.ru.

References

1. Voropai NI, Stennikov VA, Barakhtenko EA. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1111(1). ID: 012001. doi: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.

2. Voropai NI, Stennikov VA, Senderov S.M и др. Integrated infrastructural energy systems regional and interregional level. *Energy Policy*. 2015; 3:24-32.

3. René Verhoeven, Eric Willems, Virginie Harcouët-Menou, et al. Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling. *Energy Procedia*. 2014; 46:58-67. doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.158

4. Ran X, Zhou R, Yang Y, et al. The Multi-Objective Optimization Dispatch of Combined Cold Heat and Power Based on the Principle of Equal Emission. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, United States. 22-26 July 2012. pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345053

5. Amjad Anvari-Moghaddam, Ashkan Rahimi-Kian, Maryam S.Mirian, et al. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*. 2017; 203:41-56. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.007

6. Felix Bünnigab, Michael Wettera, Marcus Fuchsb, et al. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization. *Applied Energy*. 2018; 209:502-515. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.072

7. Voropai NI, Stennikov VA. Integrated smart energy systems. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika*. 2014; 1:64-73.

8. Gorodetskii VI, Skobelev PO, Bukhvalov OL. Promyshlennye primeneniya mnogoagentnykh sistem: prognozy i realii. *Trudy XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh»*. Samara: ООО «Ofort». 2016. pp. 137-162.

9. Yi Ren, Dongming Fan, Qiang Feng, et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. *Applied Energy*. 2019; 249:46-57. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119

10. Negnevitsky, M., Tomin N.V., Panasetsky D.A., et al. A neural multi-agent-based approach for preventing blackouts in power systems. *6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2014; 6-8 March 2014; Angers, Loire Valley; France; Code 105589*. 2014. pp.565-570.

11. Massel LV, Galperov VI. The development of multi-agent system of state estimation of electric power systems using event models. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. Bauman*. 2015, N.9. doi: 10.7463/ 0915. 0811180.

12. Wooldridge M, Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995;10(2):115-152.

13. Massel LV, Galperov VI. Development of multi-agent systems for distributed solutions of energy problems using agent-based scenarios. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015; 326(5):45-53.

14. Abramov VI, Kudinov AN, Evdokimov DS. Application of social modeling using agent based approach in scientific and technical development, implementation of R&D and maintenance of innovative potential. *Vestnik VGUIT*. 2019; 81(3):339–357. doi:10.20914/2310-1202-2019-3-339-357.

15. Makoveev VN. Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of territories. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2016; 5:272-289. doi: 10.15838/esc/2016.5.47.15.

Authors of the publication

Valery A. Stennikov – Melentiev energy systems institute SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: sva@isem.irk.ru.

Evgeny A. Barakhtenko – Melentiev energy systems institute SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru.

Gleb S. Mayorov – Melentiev energy systems institute SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: mayorovgs@isem.irk.ru.

Получено

27 марта 2020г.

Отредактировано

30 июля 2020г.

Принято

04 декабря 2020г.



ФАКТОР НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Ф.Л. Бык, Ю.В. Какоша, Л.С. Мышкина

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143>, Lsmyskhkina@gmail.com

Резюме: Принятие технических решений на стадии проектирования распределительной сети значительно влияет на изменение показателей бесперебойности электроснабжения потребителей. В качестве основных можно выделить SAIDI и SAIFI. Однако, методическое обеспечение для их определения на перспективу в настоящее время отсутствует. **ЦЕЛЬ.** Разработка методики расчета прогнозных значений показателей бесперебойности электроснабжения, учитывающих изменения схемно-режимных состояний участка распределительной сети 10 кВ при проектировании. Внедрение разрабатываемой методики в проектную практику целесообразно и актуально, особенно в связи с появлением распределенной малой генерации, оказывающей значительное влияние на режимы загрузки электрических сетей. Получает широкое распространение практика создания локальных энергосистем на основе малой генерации и распределительной сети, которые могут служить базовым элементом распределенной энергетики и основой трансформации энергетики, т.к. с их появлением возрастет эффективность энергетики. В том числе за счет роста надежности электроснабжения. Однако без соответствующих исследований и разработки методического обеспечения для анализа влияния проектных решений на надежность электроснабжения возникают сложности по обоснованию схем выдачи мощности малой генерации, целесообразности мероприятий по созданию локальных энергосистем и эффективности их интеграции. Разработанная МЕТОДИКА основана на применении методов статистической обработки, экспертных систем, метода Саати и направлена на применение в распределительных сетях 0,4-10 кВ. Методика позволяет сопоставить различные мероприятия с учетом изменения структурной и функциональной надежности распределительной сети, имеющихся режимных ограничений. Верификация методики осуществлена на примере участка распределительной сети жилого микрорайона. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Сопоставление результатов, полученных по методике и в программном промышленном комплексе доказали адекватность предложенной методике и достоверность получаемых прогнозных значений SAIDI и SAIFI.

Ключевые слова: проектирование, распределительная сеть, индекс технического состояния, структурная и функциональная надежность, бесперебойность электроснабжения, локальная энергосистема.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при поддержке Новосибирского государственного технического университета (проект С20-16).

Для цитирования: Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 43-54. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54.

RELIABILITY FACTOR IN THE DESIGN OF A DISTRIBUTION NETWORK

FL. Byk, YuV. Kakosha, LS. Myshkina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143>, Lsmyskhkina@gmail.com

Abstract: Decision-making at the design stage of the distribution network significantly affects the change in the indices of uninterrupted power supply to consumers. The main ones are SAIDI and SAIFI. There is no methodological support for determining the predicted values of the power supply continuity indices. The purpose of the study is to develop a methodology for calculating the predicted values of indicators of uninterrupted supply during design. A feature of the technique is the account of the circuit-mode changes in the 0.4-10 kV distribution network section. The introduction of the developed methodology into project practice is relevant and expedient. An important point is the accounting of distributed generation, which has a significant impact on the operating conditions of power supply systems. Local power systems based on distribution generation and networks 0.4-10 kV are becoming widespread, which can serve as the basis for distributed energy and energy transition in Russia. Their appearance increases the efficiency of the energy sector, including increasing the power supply reliability. However, difficulties arise in justifying distributed generation power distribution schemes, the feasibility of measures to create local power systems and the effectiveness of their integration without appropriate research and methodological support. The developed methodology is based on the use of statistical processing methods, expert systems, the SAIDI method. It is aimed at medium and low voltage distribution networks. The methodology makes it possible to compare measures taking into account changes in the structural and functional reliability of the distribution network and regime restrictions. Verification of the methodology was carried out on the example of a section of the distribution network of a residential neighborhood. Comparison of the results obtained by the methodology and in the software ETAP, proved the adequacy of the proposed methodology and the reliability of the predicted values obtained SAIDI and SAIFI.

Keywords: design; distribution network, technical condition index, uninterrupted power supply, local power system.

Acknowledgments: This work was supported by the Novosibirsk State Technical University (Project C20-16).

For citation: Byk FL, Kakosha YuV, Myshkina LS. Reliability factor in the design of a distribution network. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):43-54. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54.

Введение

Схемы электрических сетей должны обеспечить необходимую надежность электроснабжения, передачу требуемого количества с заданными показателями качества электроэнергии потребителям, возможность дальнейшего развития сети и подключения новых потребителей, удобство и безопасность эксплуатации. Следовательно, в распределительных электрических сетях важную роль играют требования к показателям, отражающим уровень надежного электроснабжения потребителей.

На стадии эксплуатации начиная с 2012 года используются индикативные показатели надежности. К ним относятся показатели SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) и SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), отражающие среднюю длительность и частоты прерывания электроснабжения потребителей в районе электрических сетей, значения которых влияют на тариф на услугу по передаче электроэнергии [1] согласно Постановлению Правительства РФ от 31.12.2009 № 1220.

На сегодняшний день, при проектировании распределительных сетей используется технико-экономическое сопоставление вариантов электроснабжения, в основе которого лежит понятие категории надежности потребителей. Однако такая ситуация во многом не соответствует современному состоянию энергетического перехода к распределенной энергетике, цифровизации электрической сети и изменениям в системе управления. Требуется введение дополнительных критериев, позволяющих повысить обоснованность технических решений на стадии управления развитием распределительных сетей. Одним из таких критериев предлагается принять учет прогнозных показателей надежности SAIDI, SAIFI, значения которых как было отмечено выше влияют на экономическую эффективность компании.

Необходимость сочетания централизованного и децентрализованного управления предполагает создание автоматики, влияющей на схемно-режимные условия работы распределительной сети, дополнительно к традиционным устройствам режимного и

противоаварийного управления. Это требует совершенствования процесса проектирования распределительной сети с целью формирования определенных свойств – безотказности, восстанавливаемости, управляемости, долговечности и других. Следовательно, актуальны задачи разработки соответствующего методического обеспечения, нормативной базы, новых средств и способов достижения поставленной цели, что обуславливает актуальность проведенных авторами исследований, научную и практическую значимость полученных результатов.

Целью работы является разработка методики расчета прогнозных значений показателей бесперебойности электроснабжения (*SAIDI* и *SAIFI*), учитывающих схемно-режимные изменения участка распределительной сети 10 кВ при проектировании:

- нового сетевого оборудования;
- присоединения к сети малой генерации

Участок распределительной сети – элемент системы электроснабжения потребителей, запитанных от одного центра питания. Очевидно, что выбор схемы и состава линий электропередач, число распределительных пунктов, количество и мощность трансформаторных пунктов 10/0.4 кВ, коммутационного оборудования зависит от двух факторов:

- мощности силовых трансформаторов районной ПС 110/10 кВ и ПС 35/10 кВ;
- числа и мощностей потребителей, их распределения по территории;
- распределения потребителей по категории надежности электроснабжения.

Научная новизна состоит в учете технического состояния сетевого оборудования при расчете показателей бесперебойности электроснабжения, а также в разработке способа определения «критических» узлов и требований для обоснования сетевого резервирования или присоединения малой генерации.

Практическая значимость состоит в дополнении методической базы для разработки схем технологического присоединения потребителей и схем выдачи мощности электростанций. Важно отметить, что полученные результаты позволяют решать комплекс задач по созданию локальных энергосистем и их объединения с ЕЭС для синхронной параллельной работы, с возможностью их отделения для сохранения бесперебойного электроснабжения при технологических нарушениях в сети 35 кВ и выше.

Существующие методики расчета прогнозных значений *SAIDI* и *SAIFI*

Для оценки безотказности силового оборудования и бесперебойности сети 35 кВ и выше, образующих федеральную и региональные системы электроснабжения, в настоящее время используются следующие методики и методические указания:

- Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утвержденная приказом № 676 Минэнерго России от 26.07.2017 (с изменениями от 17.03.2020);
- Методические указания по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа, приказ № 123 от 19.02.2019 г.

В методиках Минэнерго оценка технического состояния производится для следующего технологического оборудования [2]:

- паровые турбины, установленной мощностью 5 МВт и более;
- паровые (энергетические) котлы, обеспечивающие паром паровые турбины установленной мощностью 5 МВт и более;
- гидротурбины, установленной мощностью 5 МВт и более;
- газовые турбины, установленной мощностью 5 МВт и более;
- гидрогенераторы, номинальной мощностью 5 МВт и более;
- турбогенераторы, номинальной мощностью 5 МВт и более;
- силовые трансформаторы напряжением 110 кВ и выше;
- линии электропередачи (далее – ЛЭП) напряжением 35 кВ и выше (далее – основное технологическое оборудование).

Указанные выше методики определяет порядок оценки технического состояния основного технологического оборудования и определения оптимального вида, состава и стоимости технического воздействия на оборудование. Одно из основных назначений методики определения индекса технического состояния (ИТС) – это решение задач принятия решений по техническому воздействию на технологическое оборудование, т.е. методика применяется на действующем объекте с учетом статистических данных, собираемых в процессе эксплуатации [2].

Методические указания к методике министерства энергетики определяют порядок расчета вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования электрических станций и электрических сетей, а также порядок оценки последствий такого отказа. Методика позволяет сократить время на определение индикативных показателей бесперебойности электроснабжения.

Расчет вероятности отказа единицы основного технологического оборудования и (или) ее функционального узла осуществляется на основе:

- прогноза изменения индекса технического состояния функциональных узлов единицы основного технологического оборудования;
- прогноза вероятности отказа функциональных узлов единицы основного технологического оборудования;
- прогноза вероятности отказа единицы основного технологического оборудования.

Область применения указанных методик – электрические сети 35 кВ и выше (центры питания), которые обладают высокой наблюдаемостью и достаточным статистическим материалом по основному технологическому оборудованию, применяемые в системе управления производственными активами [2, 3]. Схемно-режимные особенности и структура данных сетей позволяет определить индексы технического состояния для каждой единицы оборудования, а также учитывать прогнозные показатели надежности при проектировании.

Однако распределительные сети 10 кВ и ниже обладают рядом значительных отличий от питающих сетей 35-220 кВ, что делает невозможным применение методик Минэнерго в данных сетях. Рассмотрим данные отличия.

Одной из главных особенностей распределительных сетей электроснабжения бытовых и сельскохозяйственных потребителей является их разветвленность и протяженность. Это обусловлено разнообразием подключаемых потребителей (как по величине, так и по составу нагрузок), ближайшим расположением точек подключения, преимущественно радиальным способом подключения нагрузок, отсутствием схем перспективного развития этих сетей. Распределительные сети имеют очень разветвленную структуру, множество коммутационных аппаратов и кабельно-воздушных связей, что приводит к частым технологическим нарушениям в работе данных сетей. В итоге отказы в сетях 6 – 10 кВ являются причиной порядка 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей, что снижает техническую эффективность данных сетей [4, 5].

Для примера можно взять часть реальной схемы электроснабжения Свердловского района г. Иркутска Южных электрических сетей АО «ИЭСК» (Рис. 1).

Из анализа схемы вытекает, что к одному центру питания 35/6 кВ подключено 44 трансформаторных подстанции 6/0,4 кВ, 2 ЦРП-6 кВ, более 60 км линий 6 кВ. При этом максимальная мощность нагрузки, присоединенной к точкам поставки электроэнергии ТП-6/0,4 кВ составляет 9 МВт, хотя на центре питания установлены трансформаторы 2х10 МВт. По действующим правилам размер присоединенной нагрузки ограничен по требованиям надежности, т.е. по критерию « $n-1$ ». Наличие большого количества основного электротехнического оборудования с различными техническими характеристиками делает невозможным применение действующих методик по расчету ИТС и вероятностей отказов оборудования.

К дополнительным трудностям при расчетах показателей надежности распределительных сетей следует также отнести отсутствие периодичности обследования необходимых параметров основного оборудования, и как следствие, невозможность ежегодно рассчитывать изменения индексов технического состояния каждой единицы оборудования.

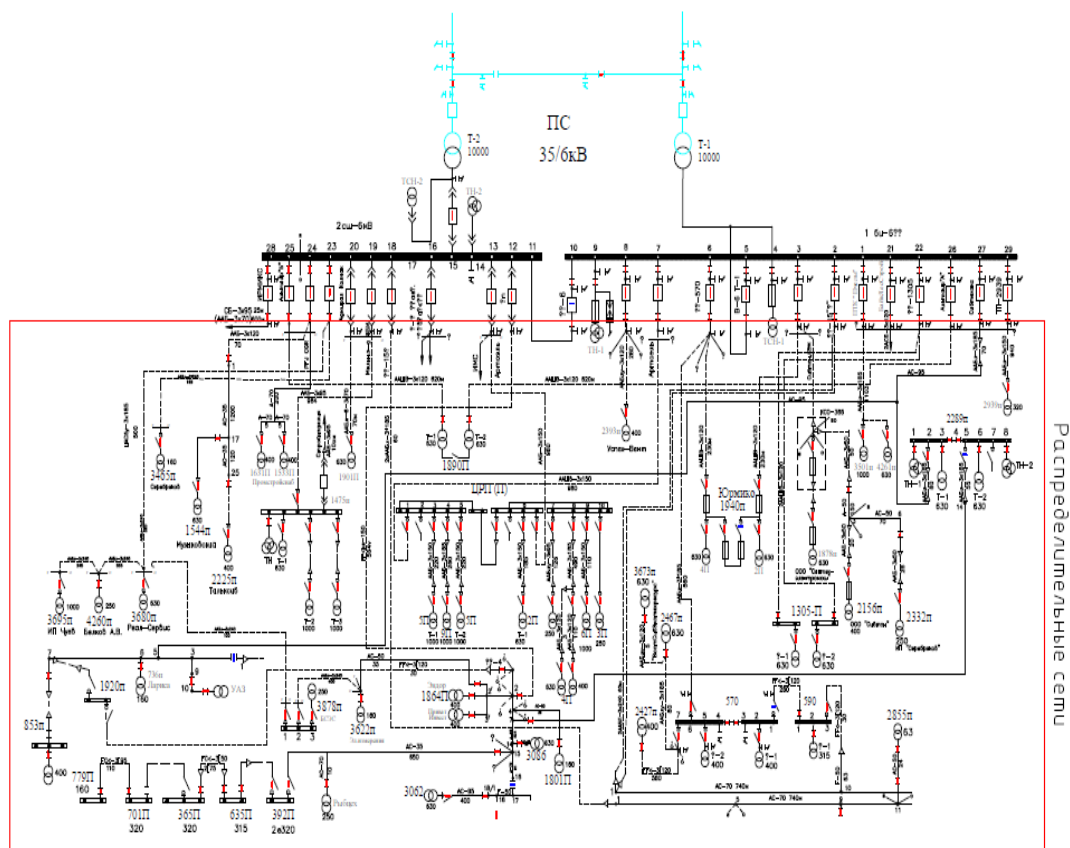


Рис. 1. Часть схемы электроснабжения Южных электрических сетей АО «ИЭСК»

Распределительные сети в наибольшей степени влияют на бесперебойность электроснабжения потребителей, а учет прогнозных показателей надежности данных сетей может повысить обоснованность принятия решений на этапе проектирования. Однако, существующие методики не позволяют в распределительных сетях выполнить поставленную задачу – определить прогнозные индикативные показатели надежности *SAIDI*, *SAIFI* на стадии управления развитием распределительной сети. Следовательно, требуется разработка дополнений, которые позволят использовать методики для расчета ИТС и вероятности безотказной работы электрооборудования распределительной сети, а также определения перспективных индикативных показателей бесперебойности электроснабжения.

Основные положения предлагаемой методики

При проектировании распределительных электрических сетей в первую очередь должны соблюдаться условия надежного и качественного электроснабжения потребителей, в отличие от основных системообразующих сетей, где на первое место выходят соблюдение технических условий, обеспечивающих безопасность и надежность электроэнергетических систем, и сохранение устойчивой синхронной работы в нормальных и послеаварийных режимах.

В дополнение к существующими методикам для определения прогнозных индикативных показателей надежности электроснабжения в распределительных сетях предлагается выполнять расчет ИТС не каждой единицы оборудования в отдельности, а определять обобщенный ИТС для групп оборудования (элементов) распределительной сети.

Обобщенный индекс технического состояния распределительной сети

Основными элементами распределительной сети 10 кВ являются силовой трансформатор, кабельная линия, масляный выключатель.

В табл. 1 представлены основные функциональные узлы элементов, выделенные в рамках данной работы.

Таблица 1

Функциональные узлы элементов распределительной сети		
Трансформатор	Кабельная линия	Выключатель
1. изоляционная система; 2. обмотки трансформатора; 3. магнитопровод; 4. высоковольтный ввод; 5. система регулирования напряжения	1. вспомогательное оборудование; 2. концевые и соединительные муфты; 3. силовой кабель	1. привод; 2. дугогасящая камера; 3. контактная система

В принятой Министерством энергетики методике оценки технического состояния основного технологического оборудования [2] не указано, каким образом были назначены те или иные весовые коэффициенты для учитываемых в расчете индекса технического состояния функциональных узлов.

В предлагаемой методике весовые коэффициенты функциональных узлов элемента сети определяются на основе экспертных оценок и статистических данных технологических нарушений, обусловленных выходом из строя функциональных узлов, соответствующих данному элементу.

Конечная балльная оценка определена методом экспертных оценок и методом Саати [6] с введением коэффициентов, отражающих компетентность экспертов. Экспертные оценки должны быть составлены для каждого участка распределительной сети, учитывая её особенности. В исследовании авторами принято, что граничные значения балльной шкалы оценки, характеризующей техническое состояние функционального узла и уровень выполнения требуемых функций. Балльная оценка функционального узла элемента сети, умноженная на вес функционального узла ($K_{вфу}$), позволяет получить обобщенный ИТС. Значение обобщенного ИТС будет применено при определении перспективных значений индикативных показателей надежности электроснабжения.

Расчет прогнозных индикативных показателей бесперебойности электроснабжения

В утвержденной Министерством энергетике методике при расчете прогноза вероятности отказа функционального узла единицы основного технологического оборудования или сегмента ЛЭП на прогнозный период 5 лет используется поправочный коэффициент $k_{п}$, учитывающий отношение величины индекса технического состояния функционального узла единицы основного технологического оборудования или сегмента ЛЭП до и после последнего технического воздействия или в предыдущем и текущем календарном году [2].

Однако в распределительных сетях существующая в настоящее время система сбора информации о параметрах, характеризующих техническое состояние оборудования не позволяет получить достоверные данные. Установлено, что данные собираются не системно, несвоевременно, должным образом не фиксируются, не проводится их формальный анализ. Существует большая доля отказов элементов сети (до 50 %), причины которых не выявлены. Это свидетельствует о неудовлетворительном состоянии системы сбора ремонтно-эксплуатационной информации на объектах электросетевого комплекса, а также не достаточным уровнем оснащения средствами технической диагностики и автоматизированными системами мониторинга [7, 8]. Все вышесказанное свидетельствует о невозможности получения достоверного значения $k_{п}$, а значит о невозможности определения вероятности отказа функционального узла элемента сети.

В связи с этим предлагаемой методикой предусматривается корректировка определения интенсивности отказов элемента распределительной сети λ_i , которую предлагается учитывать, используя отношение требуемого и текущего значений обобщенного индекса технического состояния, что представлено в формуле (1).

$$\lambda = \lambda_n = \left(\frac{\text{ИТС}_0^{\text{треб}}}{\text{ИТС}_0^{\text{тек}}} \right), \quad (1)$$

где λ_n – статистическое значение интенсивности отказов элемента системы электроснабжения, определенное на основе журналов аварийных отключений либо литературных источников, к примеру [9]; $\text{ИТС}_0^{\text{треб}}$ – требуемое значение обобщенного

индекса технического состояния, принимается равным 85 баллам для элементов распределительной сети, так как соответствует периоду приработки; $ИТС_{\text{о}}^{\text{тек}}$ – обобщенный индекс технического состояния элемента распределительной сети в фактических условиях эксплуатации.

Тогда для расчета время нахождения в неработоспособном состоянии элемента системы электроснабжения (T) воспользуемся известным выражением:

$$T = \lambda \cdot t_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{в}}$ – время восстановления в рабочее состояние i -ого элемента системы электроснабжения

Прогноз средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии на точку поставки TCO (SAIDI) с учетом распределительной сети определяется по формуле:

$$SAIDI_{\Pi} = SAIDI_T - \left[\left(\sum T_i \times N_i / N_{\max} \right)^T - \left(\sum T_i \times N_i / N_{\max} \right)^{\Pi} \right]. \quad (3)$$

Прогноз средней частоты прекращений передачи электрической энергии на точку поставки TCO (SAIFI) с учетом распределительной сети определяется по формуле:

$$SAIFI_{\Pi} = SAIFI_T - \left[\left(\sum \lambda_i \times N_i / N_{\max} \right)^T - \left(\sum \lambda_i \times N_i / N_{\max} \right)^{\Pi} \right], \quad (4)$$

где T – индексация текущего состояния системы электроснабжения;

Π – индексация прогнозного состояния системы электроснабжения;

λ_i – интенсивность отказов i -ого критического элемента системы электроснабжения, ч;

N_i – количество точек поставки отключаемых в результате технологического нарушения из-за отказа i -ого критического элемента системы электроснабжения, шт;

$N_{\max}$ – количество точек поставки в системе электроснабжения, шт.;

T_i – время нахождения в неработоспособном состоянии i -ого критического элемента системы электроснабжения;

Критическим элементов системы электроснабжения в методике является элемент, при отказе которого наблюдается наибольшее количество отключаемых точек присоединения. Для поиска критических элементов системы электроснабжения необходимо определить количество узлов, отключаемых при отказе i -ого элемента сети (N_i в формулах (3), (4)). Предлагается осуществлять моделирование отказов элемента с контролем установившегося электрического режима и фиксации отключаемых узлов с помощью ПВК «RastrWin3», АНАРЭС, Eurostag, ETAP либо других расчетных комплексов с фиксацией количества отключаемых потребителей для определения максимального значения по формуле (5).

$$N_i = \max(N_{jg}), \quad (5)$$

где N_{jg} – количество отключаемых точек присоединения потребителей при отказе g -го элемента j -го типа; $j = 1 \dots J$ – порядковый номер типа элемента сети (трансформаторы, кабельные линии электропередачи, выключатели и др. ключевые типы элементов системы электроснабжения); $g = 1 \dots G$ – порядковый номер элемента в рамках одного типа, G – количество элементов одного типа. При этом делается допущение об отсутствии взаимосвязанных отказов, учитываются только одиночные отказы оборудования.

Можно отметить наличие довольно амбиционных планов по снижению показателей бесперебойности электроснабжения в России. Средняя продолжительность отключений электроэнергии SAIDI по Сибири в целом на конец 2019 года составила 2,53 часа, в результате реализации программы «Цифровая трансформация 2030» этот показатель снизится в 2024 году до 2,39 часа, а в 2030 году – до 2,22 часа, что составляет 1,1 % в год. Средняя частота отключений (SAIFI) по Сибири составляет 1,63 единиц, благодаря реализации программы, в 2024 году этот показатель должен снизиться до 1,55 и в 2030 году – до 1,44 [10], что составляет 0,9 % в год.

Очевидно, что основное влияние на изменение указанных показателей будут оказывать технические решения на уровне распределительных сетей 0,4-10 кВ, что подчеркивает актуальность предложенной методики и целесообразность ее практического применения.

Применение методики для управления развитием распределительной сети

Предложенная методика позволяет рассчитывать прогнозные показатели бесперебойности электроснабжения потребителей, а также принимать конкретные

технические решения по увеличению надежности распределительной сети при управлении её развитием.

Сравнение прогнозных показателей бесперебойности позволяет выявить критические элементы сети, отказ которых приводит к наибольшему отключению потребителей (как по мощности, так и по времени восстановления электроснабжения), что позволяет принять соответствующие меры по резервированию данных элементов сети.

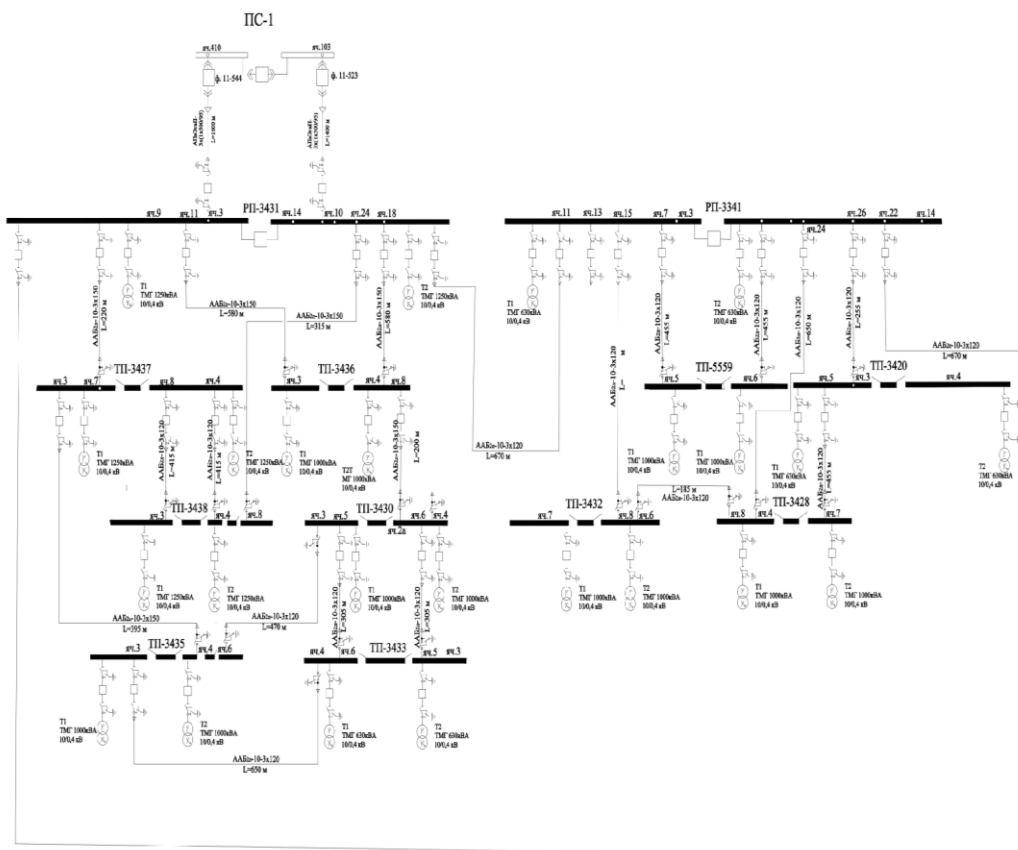
Одним из методов резервирования и современной тенденцией развития сетей является строительство малой распределенной генерации (МРГ), что отмечается многими экспертами [4,11,12,13]. МРГ может быть использована для обеспечения надежности энергосистемы, так как с ее появлением снижается нагрузка магистральных и питающих сетей, растут запасы пропускной способности сети, снимается проблема локальных дефицитов в районах закрытых центров питания [14]. С появлением МРГ возможно значительно сократить инвестиции на развитие распределительной сети и повысить бесперебойность электроснабжения.

Предлагаемая методика позволит определить наиболее оптимальные точки подключения генерации для повышения надежности электроснабжения потребителей, находящихся «под угрозой» потери питания. Таким образом, повышается надежность всей электрической сети. Также появляются дополнительные критерии по выбору мощности МРГ с учетом необходимости резервирования не всей сети, а только её части. Методика также может быть применена для определения оптимальных точек объединения нескольких локальных систем электроснабжения (ЛСЭ) в единую энергосистему малой мощности и создание универсальных энергетических ячеек *Microgrid* с инфраструктурой переменного тока [15].

Ниже приведён пример апробации предложенной методики, позволяющий судить о достоверности полученных результатов.

Результаты

Апробация предложенной методики осуществлена на примере участка распределительной сети жилого микрорайона, электроснабжение которого осуществляется от ПС-1 (рис. 2) Структура нагрузки - преимущественно бытовое потребление с небольшой долей непроизводственных предприятий связанных со сферой услуг. Суммарное количество точек поставки в анализируемом районе – 108, мощность присоединенной нагрузки - 9, 42 МВт.



В результате анализа структурной и функциональной надежности сети в ПВК *ЕТАР* определены значения показателей бесперебойности текущего состояния анализируемой системы электроснабжения:

$$SAIDI_T = 2,6420 \text{ ч}, SAIFI_T = 0,2411 \text{ 1/год}$$

Далее, с помощью анализа установившихся режимов определены критические элементы, отказы которых сопровождаются максимальным количеством отключаемых точек поставки:

- К-10, сопровождающееся отключением 12 точек поставки,
- трансформаторы ТП-3438, сопровождающееся отключением 9 точек поставки;
- отказы выключателей не приводит к прерыванию электроснабжения потребителей.

Так как к наибольшему количеству отключаемых точек поставки приводит отказ К-10 (выделенная область на рис. 3), принято решение о необходимости резервирования данной линии.

В качестве мероприятий по повышению бесперебойности электроснабжения рассматривается присоединение МРГ с созданием на ее основе сбалансированной локальной энергосистемы. На рис. 3 схематично показано место присоединения МРГ (шина ТП-3437) и выделена зона локальной системы электроснабжения.

Моделируется, что МРГ выполняет функцию резервирования сети, поэтому отключение К-10 не приводит к отключению нагрузки в выделенном районе, тогда ее мощность ($P_{\text{МРГ}}$) определяется исходя из мощности, присоединенной к узлам нагрузки ($P_{\text{ТП-...}}$) с учетом 20% аварийного резерва:

$$P_{\text{МРГ}} = 1,2 \times (P_{\text{ТП-3437}} + P_{\text{ТП-3430}} + P_{\text{ТП-3435}} + P_{\text{ТП-3433}}) \quad (6)$$

$$P_{\text{МРГ}} = 4 \text{ МВт}$$

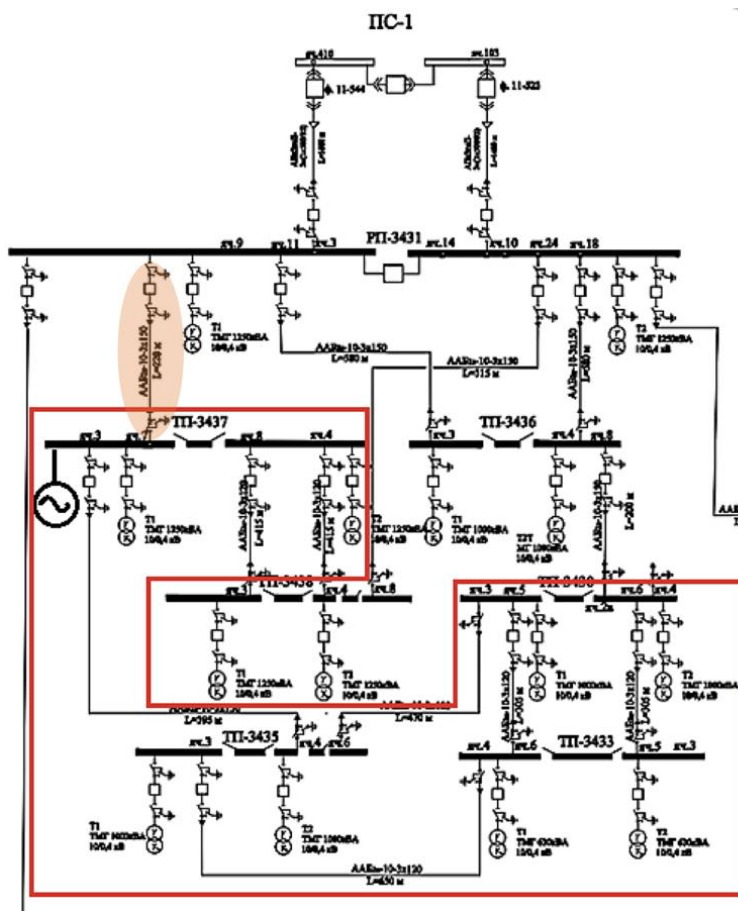


Рис. 3. Выделяемая локальная энергосистема

Следовательно, моделируем присоединение 4 ГПУ по 1 МВт. Показатели работоспособности выбранных ГПУ: $t_b = 14,34 \text{ ч}$; $\lambda = 6,17 \text{ раз/год}$.

Согласно предложенной методике рассчитаны прогнозные показатели бесперебойности электроснабжения при присоединении МРГ и создании локальной системы электроснабжения:

$$SAIDI_{\Pi} = 2,3651 \text{ ч}, SAIFI_T = 0,2211 \text{ 1/год}$$

Таким образом строительство МРГ в зоне анализируемого участка распределительной сети позволяют улучшить показатели *SAIDI* и *SAIFI*: наблюдается снижение показателей на 11,5% и 9 % соответственно. Что доказывает эффективность строительства МРГ для повышения бесперебойности электроснабжения потребителей.

В табл. 2 показано сопоставление результатов, полученных с применение предложенной авторами методикой, с результатами расчетов в ПБК ЕТАР.

Таблица 2

Сопоставление прогнозных значений *SAIFI* и *SAIDI*, полученных различными методами

Метод расчета	Методика	ПБК ЕТАР	Отклонение, %
<i>SAIDI</i>	2,3651	2,3632	0,1
<i>SAIFI</i>	0,2211	0,2076	5,0
$\Delta SAIDI, \%$	11,5	11,8	-
$\Delta SAIFI, \%$	9,1	16,0	-

Отклонения прогнозных показателей, определенных по методике, не превышают 5% от показателей, полученных при расчете с использованием ПБК ЕТАР. Это позволяет судить о достоверности методики и возможности ее применения для повышения обоснованности принимаемых технических решений на стадии управления развитием распределительных сетей, без применения дополнительного дорогостоящего программного обеспечения.

Заключение

Действующий порядок установления тарифа на услуги по передаче электрической энергии в России определяет зависимость экономической эффективности сетевых компаний и бесперебойности электроснабжения. Однако, при принятии решений на стадии управления развитием районных систем электроснабжения и распределительных сетей 0,4-10 кВ указанные показатели не учитываются.

Для повышения обоснованности проектных решений для распределительной сети 10 кВ и ниже разработана методика, позволяющая рассчитывать прогнозные значения показателей *SAIDI* и *SAIFI* при проектировании развития распределительной сети, которая может служить дополнением действующей методики Минэнерго России.

Предлагается применение обобщенных индексов технического состояния элементов распределительной сети и взаимосвязь с перспективными значениями индикативных показателей бесперебойности электроснабжения. На примере участка распределительной сети выполнена апробация методики. Путем сопоставления результатов с расчетами, выполненными в ПБК ЕТАР, доказана достоверность получаемых результатов: отклонения составили не более 5 %.

Наличие прогнозных значений показателей *SAIDI* и *SAIFI* в проектной деятельности повысит обоснованность принимаемых решений, в том числе по обоснованию схем выдачи мощности малой генерации при технологическом присоединении к сетям, мероприятий по созданию локальных энергосистем и их объединению между собой с учетом индексов технического состояния оборудования, структурной и функциональной надежности распределительной сети и имеющихся режимных ограничений, что является необходимым элементом управления развитием при проектировании.

Литература

1. Любимова Н.Г., Порцина Е.Н. Анализ зарубежных методов регулирования тарифов на услуги по передаче электрической энергии сетевыми организациями // Инновации и инвестиции. 2020. №1. С. 163-167
2. Грабчак Е.П. Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики // Надежность и безопасность энергетики. 2017. №10(4). С. 268-274.
3. Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Кокин С.Е. Система управления техническими активами предприятий электросетевого комплекса // Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 36-40.
4. Батенина В.М., Бушуева В.В., Воропай Н.И. Инновационная электроэнергетика 21. М.: ИЦ «Энергия». 2017. 584 с.
5. Byk F.L., Myshkina L.S., Sabadash I.A. Features of the functional reliability of 0.4-10 kV distribution networks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 791. doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012041

6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с
7. Nazarychev A., Andreev D., Tadjibaev A., et al. Methods for calculation of the marginal exploitation lifespan of power transformers 35 kV and higher based on the state index // E3S Web of Conferences, 2018. V. 58.
8. Vysogorets S., Nazarychev A., Tadjibaev A., et al. Development of express method for liquid dielectric quality control as a step to increase the reliability and effectiveness of oil-filled equipment exploitation // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, pp. 36-41
9. Васильев, А.П. Методы и средства обеспечения надежностью и безопасностью электрических сетей и установок электроэнергетических систем. СПб. : Издательство политехнического университета, 2014. 454 с.
10. Россети Сибирь готовит платформу для перехода на цифровую модель управления сетями. Доступно по: <https://www.mrsk-sib.ru/> Ссылка активна на 25 сентября 2020.
11. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М: Энергетический центр управления Московской школы управления Сколково, 2018. 87 с. Доступно по: http://www.energsovet.ru/stat/skolko_914.pdf Ссылка активна на 15 октября 2020.
12. Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V. Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth // Thermal Engineering. 2019. V. 66(12), pp. 869-880
13. Илюшин П.В. Анализ особенностей сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с объектами распределённой генерации // Энергетик. 2016. № 12. С. 21-25.
14. Мышкина Л.С. Малая генерация – средство повышения живучести энергосистемы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19, № 1-2. С.23-30.
15. Fishov A.G., Lizalek N.N., Kakosha Y.V., et al. Microgrid with Alternate Current Infrastructure Proceeding of the 54th international universities power engineering conference UPEC 2019, Bucharest: IEEE, 2019. 6 p. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8893545>. Ссылка активна на 20 октября 2020.

Авторы публикации

Бык Феликс Леонидович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

Какоша Юрий Васильевич – аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

Мышкина Людмила Сергеевна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Lyubimova NG, Portsina EN. Analysis of foreign methods for regulating tariffs for electric power transmission services by network organizations. *Innovacii i investicii*. 2020;1;163-167.
2. Grabchak EP. Assessment of the technical condition of power equipment in the digital economy Safety and Reliability of Power Industry; 2017; 10(4); 268-274. doi: 10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274.
3. Khalyasmaa AI, Dmitriev SA, Kokin S.E. Technical asset management system for power grid enterprises. *Industrial power engineering*. 2014;2: 36-40.
4. Batenin VM, Bushueva VV, Gurgling NI. *Innovative electric power industry* – 21. М.: EC "Energy"; 2017.
5. Byk FL, Myshkina LS, Sabadash IA. Features of the functional reliability of 0.4-10 kV distribution networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;791:7. doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012041
6. Saaty T. *Fundamentals of Decision Making with the Analytic Hierarchy Process*. Moscow, Radio and Communication 1993; 278 p.
7. Nazarychev A, Andreev D, Tadjibaev A, et al. Methods for calculation of the marginal exploitation lifespan of power transformers 35 kV and higher based on the state index. *E3S Web of Conferences*, 2018; 58. doi: 10.1051/e3sconf/20185802006
8. Vysogorets S, Nazarychev A, Tadjibaev A, et al. Development of express method for liquid dielectric quality control as a step to increase the reliability and effectiveness of oil-filled equipment exploitation. *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 36-41 doi: 10.1051/e3sconf/20172501013

9. Vasil'ev AP. *Metody i sredstva obespecheniya nadezhnost'yu i bezopasnost'yu elektricheskikh setej i ustanovok elektroenergeticheskikh sistem*. SPb. : Polytechnic University Publishing House; 2014
10. Rosseti Sibir' gotovit platformu dlya perekhoda na cifrovuyu model' upravleniya setyami. Available at: <https://www.mrsk-sib.ru> Accessed: 25 Sept 2020.
11. Khokhlov A, Melnikov Y, Veselov F, et al. Raspredeleonnaya energetika v Rossii: potencial razvitiya. M: Energy Management Center of the Moscow School of Management Skolkovo. 2018; 87. Available at: http://www.energsovet.ru/stat/skolkovo_914.pdf Accessed to: 15 Oct 2020.
12. Filippov SP, Dilman MD, Ilyushin PV. Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth. *Thermal Engineering*. 2019; 66(12); 869-880. doi: 10.1134/S0040601519120036
13. Ilyshin PV. Analysis of the peculiarities of internal power supply networks of industrial enterprises with distributed generation facilities. *ENERGETIK*. 2016; 12; 21-25.
14. Myshkina LS. Small generation - a means of increasing the survivability of the power system. Proceedings of the higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017; 19(1-2); 23-30.
15. Fishov AG, Lizalek NN, Kakosha YV, et al. Microgrid with Alternate Current Infrastructure. *Proceeding of the 54th international universities power engineering conference UPEC 2019, Bucharest: IEEE, 2019*. 6 p. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8893545>. Accessed to: 20 Oct 2020. doi: 10.1109 / UPEC.2019.8893496.

Authors of the publication

Felix L. Byk – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Yuri V. Kakosha – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Lyudmila S. Myshkina – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено

20 октября 2020г.

Отредактировано

28 ноября 2020г

Принято

28 ноября 2020г.



ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ ПО ВЕКТОРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Н.Э. Готман, Г.П. Шумилова

Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера
Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар, Россия
iespn@ksc.komisc.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблему определения изменения в топологии электрической сети, возникающей вследствие отключения/включения одной из линий электропередачи. Разработать алгоритм обнаружения изменения состояния линии в реальном времени, используя вектора напряжений в узлах электрической сети и вектора токов в линиях, полученные от устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) во время переходного процесса. Провести экспериментальные исследования на 14-узловой тестовой схеме электрической сети. МЕТОДЫ. Поставленная задача решена методом из области искусственного интеллекта, таким как машинное обучение, в частности "глубокое обучение". РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, предложено применение метода определения состояния линий с помощью классификатора на основе сверточных нейронных сетей (СНС). Проведены расчеты для различных архитектур СНС с различным количеством временных срезов от момента изменения состояния линии. Доказана эффективность совместного использования УСВИ и СНС при решении данной задачи. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложено решение определения изменения состояния линии в переходном режиме с помощью классификатора сверточных нейронных сетей, используя векторные измерения напряжения и тока в реальном времени. Получена высокая точность, вплоть до 100 %, определения состояния линии, независимо от зашумления данных. Изменение топологии сети определяется в самом начале переходного процесса практически мгновенно, что позволит оператору несколько раз в течение первых секунд идентифицировать состояние линии, чтобы убедиться в правильности принимаемых решений.

Ключевые слова: электрическая сеть, топология, синхронизированные векторные измерения, глубокое обучение, сверточные нейронные сети.

Для цитирования: Готман Н.Э., Шумилова Г.П. Идентификация изменения состояния линии по векторным измерениям на основе сетей глубокого обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 55-67. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-55-67.

IDENTIFICATION OF LINE STATUS CHANGES USING PHASOR MEASUREMENTS THROUGH DEEP LEARNING NETWORKS

NE. Gotman, GP. Shumilova

Federal Research Center Komi Scientific Center of the Ural Branch Russian
Academy of Sciences, ISE and EPN, Syktyvkar, Russia
iespn@ksc.komisc.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the problem of detecting changes in a power grid topology that occurs as a result of the power line outage / turning on. Develop the algorithm for detecting changes in the status of transmission lines in real time by using voltage and current phasors captured by phasor measurement units (PMUs) are placed on buses. Carry out experimental research on IEEE 14-bus test system. METHODS. This paper proposes a method from the field of artificial intelligence such as machine learning in particular "Deep Learning" to solve the problem. Deep Learning arises as a computational learning technique in which high level abstractions are hierarchically modelled from raw data. One of the means to effectively extract the

inherent hidden features in data are Convolutional Neural Networks (CNNs). RESULTS. The article describes the topic relevance, offers to apply the method for detecting status of lines using a CNN classifier. The combination of different CNN architectures and the number of time slices from the moment of line status change are used to detect the power grid topology. The effectiveness of the joint use of PMUs and CNN in solving this problem has been proven. CONCLUSION. A solution for the line status change detection in the transient states using a CNN classifier is proposed. A high accuracy of the line status detection was obtained despite the influence of noise on measurement data. A change in the network topology is detected at the very beginning of the transient state almost instantly. It will allow the operator several times during the first seconds to identify the line state in order to make sure that the decisions made are correct.

Keywords: power network, topology, phasor measurement unit, deep learning, convolutional neural networks.

For citation: Gotman NE, Shumilova GP. Identification of line status changes using phasor measurements through deep learning networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):55-67. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-55-67.

Введение

Создание топологической модели электроэнергетической системы (ЭЭС) является очень важным этапом моделирования ЭЭС в реальном времени. Ошибки в этой модели могут привести к неверным и потенциально опасным управляющим воздействиям. В этой ситуации проверка правильности модели топологии электрической сети имеет большое значение.

Для эффективного управления современной энергосистемой с наличием децентрализованных источников энергии требуются надежные методы определения топологии электрической сети, которые поддерживаются современными измерительными системами, обеспеченными устройствами синхронизированных векторных измерений (УСВИ) [1]. УСВИ имеют возможность записывать быстрые переходные процессы с высокой точностью. Действительно, эти события могут произойти в течение нескольких секунд, что затрудняет их обнаружение традиционными системами SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Временная синхронизация географически распределенных измерений обеспечивает лучшую оперативную осведомленность о топологии сети в режиме реального времени.

Предложено множество подходов с использованием УСВИ для обнаружения топологических изменений сети, вызванных отключениями линии, например, [2–6]. Отправной точкой в этих подходах является то, что отключение линии вызывает изменение вектора напряжения (модуля и фазового угла) во всех узлах электрической сети, и эти изменения больше, чем во время нормальной работы, например, при качаниях.

Ключевая особенность, которая делает идентификацию (включена / не включена) линии возможной, это то, что измеренные УСВИ значения вектора напряжения в узле различны для разных сценариев отключения линии, т.е. это своего рода "подписи", которые и используют авторы рассматриваемых работ для определения изменения топологии электрической сети. Каждый метод имеет свою специфику, но во всех методах определение топологии проводится в квазиустановившемся режиме, т.е. после окончания переходного процесса, вызванного каким-то непредвиденным обстоятельством, что увеличивает время определения отключения линии.

В работах [7–9] определение топологии сети было выполнено с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС), где в качестве входных переменных использовались модуль и фаза вектора напряжения в узлах размещения УСВИ и перетоки активной и реактивной мощностей на конце линий около узла размещения УСВИ в установившемся режиме. В этих работах задача определения топологии сети также решалась в установившемся режиме.

С появлением систем мониторинга переходных режимов WAMS (*Wide Area Measurement Systems*) и последующего развертывания таких устройств мониторинга, центры управления заполняются все большим количеством данных. УСВИ способны сделать от 10 до нескольких сотен замеров за секунду, что намного выше, чем в традиционных системах SCADA, которые обычно выполняют один замер за 2–4 секунды. Эта новая парадигма представляет собой огромное количество необработанных данных, собранных каждый день. Например, в [10] говорится, что одна выборка УСВИ на частоте

60 Гц может создавать примерно 721 МБ данных в день, а набор данных, используемых от 44 УСВИ, составляет приблизительно 1 ТБ в месяц. Поэтому, как здесь сказано, широкомасштабные системы УСВИ представляют проблемы для обработки такого объема данных. Согласно [11], эта проблема может быть решена методами из области искусственного интеллекта, такими как машинное обучение, в частности «глубокое обучение» (*Deep Learning*). Эти методы могут быть полезны для извлечения характеристик из необработанных данных, причем новейшие алгоритмы машинного обучения способны сами находить признаки, по которым можно классифицировать входные данные.

Много исследовательских работ выполнено по применению глубокого обучения в энергосистемах: для прогнозирования нагрузки [12], кибербезопасности [13], для определения места короткого замыкания в линии [14], восстановления энергосистемы после аварии, выявления дефектов поврежденного оборудования в результате короткого замыкания [15]. Эти исследования охватывают такие области энергетики, как энергопотребление, умные сети (*smart grid*), рынок электроэнергии, надежность и др. [16]. Большинство статей по этим работам опубликовано, начиная с 2016 года. Известна одна работа по применению нейронных сетей глубокого обучения непосредственно для определения топологии электрической сети [17]. Это исследование сосредоточено на проблеме определения топологии в распределенной энергосистеме в реальном времени. Разработан новый метод определения топологии на основе сети глубокого обучения, используя концепцию ядро-узел-карта (*kernel-node-map*). Эта нейронная сеть адаптируется к физической топологии распределенной энергосистемы. В работе подтверждены преимущества по сравнению с современными методами.

В данной статье предлагается метод определения топологии традиционной электрической сети на основе сетей глубокого обучения, в котором используются данные переходного режима, измеренные устройствами синхронизированных векторных измерений.

Краткое введение в глубокие нейронные сети, и, в частности, в сверточные нейронные сети (СНС), как метод решения поставленной задачи, представлен в разделе 1. Раздел 2 посвящен исследованию применения СНС для определения изменения состояния линии в переходном режиме с представлением результатов исследования. В разделе "Результаты и дискуссия" проведено сравнение методов на основе СНС и ИНС по точности определения топологии электрической сети. В заключении сделаны выводы по результатам исследований и намечены дальнейшие направления работы по этой теме.

Материалы и методы

Глубокие нейронные сети как метод решения задачи

Глубокие нейронные сети (*Deep Learning Neural Networks (DLNN)*) становятся одним из самых популярных методов машинного обучения при создании систем искусственного интеллекта в разных областях, таких как распознавание речи, обработка естественного языка, компьютерное зрение, медицинская информатика и др. [18]. Их отличительными особенностями являются большее количество нейронов в слоях, более сложные способы соединения, автоматическое выделение признаков и увеличение вычислительных мощностей для обучения. Как указано выше, много исследовательских работ выполнено и по применению *DLNN* в энергосистемах.

Одна из причин успешного применения *DLNN* заключается в том, что сеть автоматически выделяет из данных важные признаки, необходимые для решения задачи. При обработке больших объемов данных нейронная сеть справляется с выделением признаков гораздо лучше, чем сам человек.

Многослойный перцептрон [19] является примером архитектуры глубокой нейронной сети. Такая сеть называется полносвязной. Существуют другие архитектуры *DLNN*, в частности неоконитрон, автокодировщики, сверточные нейронные сети, ограниченная машина Больцмана, глубокие сети доверия, сети долго-краткосрочной памяти, управляемые рекуррентные нейронные и сети остаточного обучения [20].

Для решения задачи определения изменения состояния линии наиболее из всех перечисленных подходят сверточные нейронные сети (СНС). Учитывая их свойство редкой связности и совместного использования параметров, они подходят для работы с данными пространственного распределения. Поэтому остановимся на более подробном представлении этих сетей.

СНС являются особым типом архитектуры искусственных нейронных сетей для обработки данных, нацеленной на эффективное распознавание входной информации. СНС получает входные данные, преобразует их с помощью ряда взаимосвязанных слоев и на

выходе выдает набор вероятностей (оценок). Существует много вариантов архитектуры СНС, но все они основаны на чередовании слоев, показанных на рис. 1.

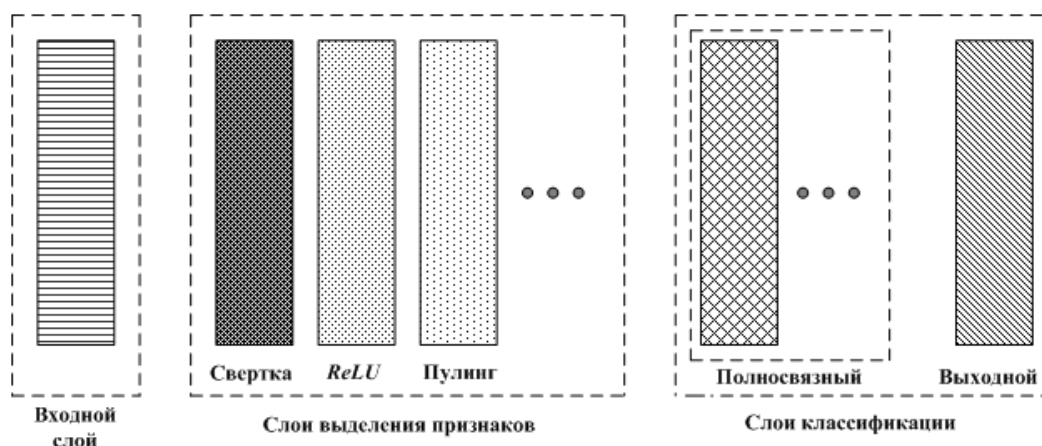


Рис. 1. Архитектура сверточной нейронной сети

Здесь имеются три основные группы слоев: 1) входной слой; 2) слои выделения признаков; 3) слои классификации.

СНС представляют собой метод, который чаще всего используется для классификации изображений. Входной слой принимает трехмерные сигналы, при этом учитывается двухмерность изображения и разделение его на три канала: красный, синий, зеленый.

Перед началом расчетов на модели с СНС входные данные нормализуются. Нормализация входных данных необходима для адекватного применения математических моделей и компьютерных расчетов при вычислениях, связанных с большими и малыми величинами, для равномерного их распределения, представления значений в области $[0,1]$. В конечном счете, нормализация увеличивает информативность данных. Обычно используется формула, которая позволяет растянуть данные, подаваемые на вход СНС, от 0 до 1:

$$f(x_i, \min, \max) = \frac{x_i - \min}{\max - \min}, \quad (1)$$

где f – функция нормализации, x_i – элемент входных данных, $\min$, $\max$ – соответственно, минимальное и максимальное значения среди элементов входного образца.

Слои выделения признаков имеют повторяющуюся структуру (свертка $\rightarrow$ ReLU $\rightarrow$ пулинг).

Сверточный слой, представляет из себя набор карт признаков, у которых есть сканирующее ядро (или, по-другому, фильтр). Мы получаем вход, применяем к нему ядро свертки и получаем на выходе карту признаков (рис. 2).

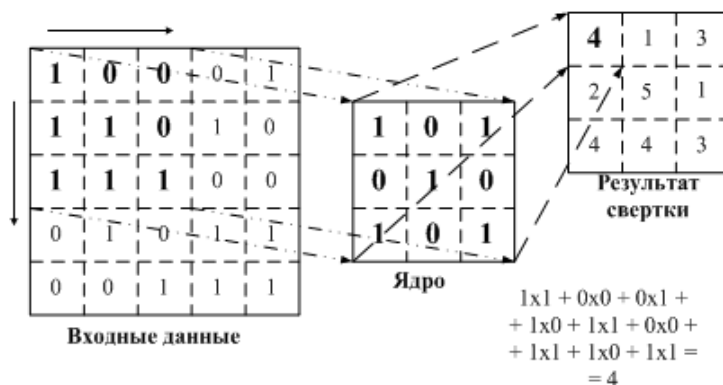


Рис. 2. Операция свертки

Входом свертки могут быть исходные данные или карта признаков, вычисленная другой сверткой. Размер всех карт сверточного слоя одинаков и вычисляется по формулам [21]:

$$\left. \begin{aligned} w &= mW - kW + 1, \\ h &= mH - kH + 1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где w, h – вычисляемые, соответственно, ширина и высота сверточной карты; mW – ширина предыдущей карты; mH – высота предыдущей карты; kW – ширина ядра; kH – высота ядра.

В ходе применения свертки ядро передвигается по ширине и высоте входной карты (рис. 2). Результатом является сумма произведений элементов ядра на соответствующие элементы части входной карты под ним. Математически операция свертки описывается формулой:

$$(F \times K)[a, b] = \sum_{x=1}^{kH} \sum_{y=1}^{kW} F[a+x-1, b+y-1] \times K[x, y] \quad (3)$$

где F – входная карта признаков, K – ядро свертки, $F \times K$ – результат свертки.

Блок линейной ректификации (*ReLU*), который на самом деле является функцией активации (здесь показан в виде слоя, поскольку так принято в литературе). Функция линейной ректификации активирует блок, если входной сигнал больше заданной величины. Функция описывается формулой $f(x) = \max(0, x)$, ее график показан на рис. 3.

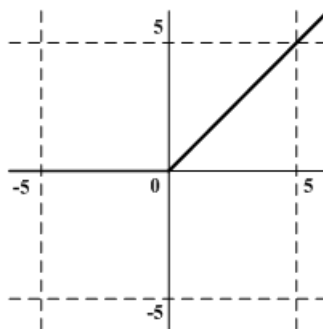


Рис. 3. Функция линейной ректификации

Блоки *ReLU* находят широкое применение в современных глубоких сетях, поскольку хорошо работают во многих ситуациях.

Пулинговый слой уменьшает размерность карт предыдущего слоя, что приводит к ускорению вычислений. При этом происходит извлечение доминирующих признаков. Применяют один из двух видов пулинга: максимальный и средний. Максимальный пулинг выбирает максимальное значение из блока карты, размеры которого соответствуют ядру пулингового слоя. Средний пулинг возвращает среднее значение.

Слои классификации – это слои обычного многослойного персептрона, моделируют сложную нелинейную функцию, оптимизируя которую улучшается качество распознавания. Полносвязные слои являются важной составляющей СНС, в которую передается результат свертки и объединения, и определяется окончательное решение по классификации.

Обучение СНС проводится по методу обратного распространения ошибки. Оно подобно обучению многослойного персептрона.

Объект исследования и численные эксперименты

Для определения изменения в топологии электрической сети использована СНС, ориентированная на 14-узловую тестовую схему *IEEE* (рис. 4). На схеме показано размещение УСВИ в узлах 2, 4, 5, 6, 9, 11 и 13, полученное как результат оптимальной расстановки по критерию минимума количества устройств [22], обеспечивающих топологическую наблюдаемость ЭЭС. Наблюдаемость узла 8 обеспечивается за счет нулевой инъекции транзитного узла 7.

При показанной на схеме рис. 4 расстановке устройств УСВИ получаем семь векторных измерений напряжений и 27 векторных измерений токов, но используем из них только семь измерений фаз напряжения и только 20 измерений модулей токов, поскольку для семи линий имеем измерения на обоих концах, и одно из которых нет необходимости рассматривать. Отключения трансформаторов не рассматривались.

База данных для определения изменения состояния линий получена с

использованием программно-вычислительного комплекса (ПВК) «RastrWin 3» (v1.80.0.1485), в состав которого входит программный модуль «RUSTab», предназначенный для расчета электрохимических переходных процессов. В ПВК «RastrWin 3» воспроизведена 14-узловая схема электрической сети «IEEE 14 Bus Test Case» на основе данных о параметрах сети и генераторов из ПВК «DigSILENT PowerFactory».

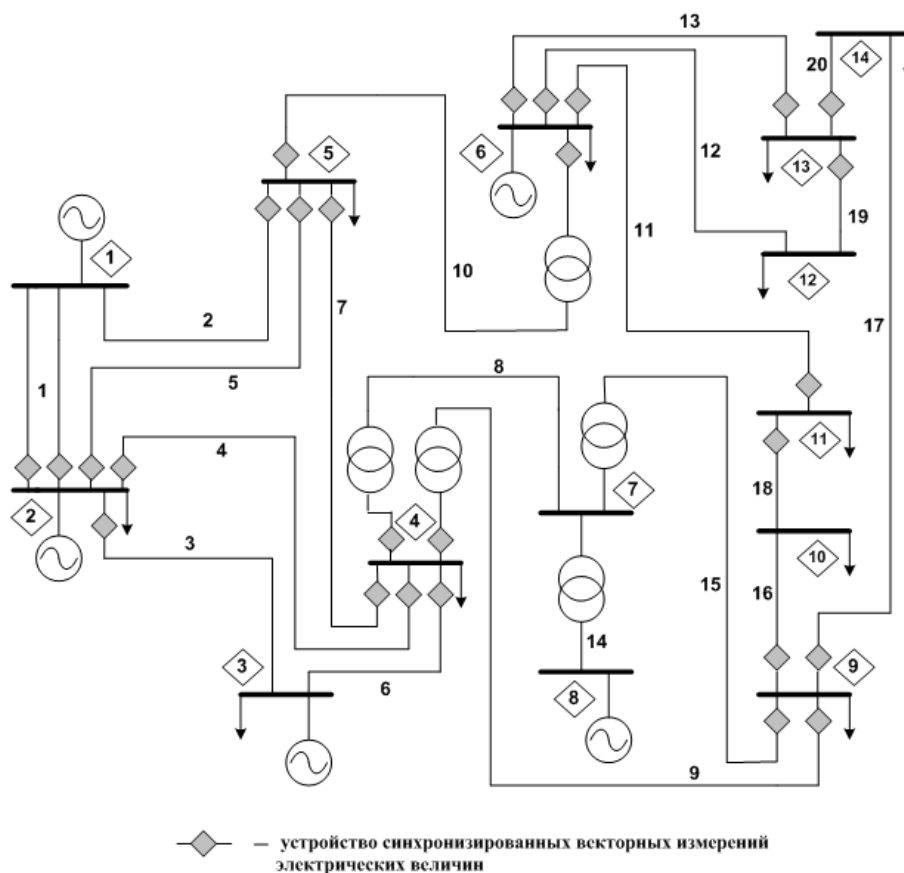


Рис. 4. 14-узловая тестовая схема IEEE

Для моделирования отключения/включения линии рассчитаны 500 режимов путем изменения нагрузки во всех нагрузочных узлах в диапазоне от 70 до 150 процентов от базового уровня и добавления к полученным значениям случайной величины, составляющей от 0 до 20 процентов величины базовой нагрузки в узле.

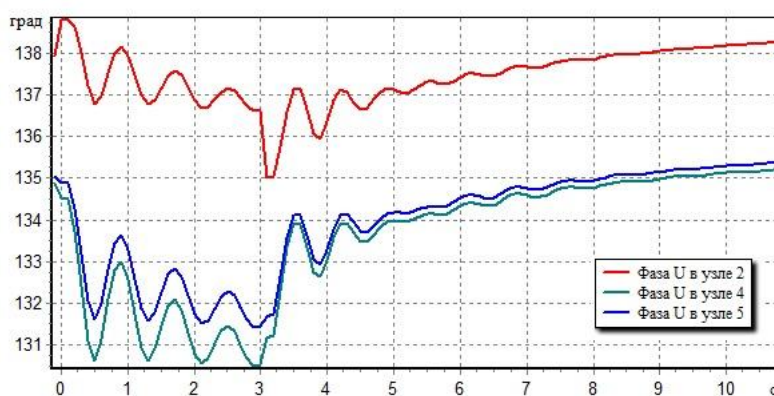


Рис. 5. Графики фаз напряжения в узлах 2, 4, 5 при аварийной ситуации на линии 2

Для каждого режима проведены расчеты переходных режимов, связанных с отключением одной из линий и включением ее через три секунды устройством автоматического повторного включения (АПВ). Результаты расчетов 200 режимов из 500 использованы для обучения сверточной нейронной сети, а 300 – для тестирования. На рис. 5 представлены графики фаз напряжения в узлах 2, 4 и 5 при отключении линии 2 и

включении ее устройством АПВ. Это ближайшие к месту аварийной ситуации узлы с установленными в них УСВИ. Время 0 с – это время отключения линии, 3 с – время срабатывания устройства АПВ.

Значения измерений, полученные расчетами на ПВК «RastrWin 3», использовались с добавлением случайным образом шума: изменение фазы напряжения на $\pm 0,5^\circ$ и модуля тока на $\pm 0,5\%$. Шум добавлялся из того расчета, что УСВИ имеют относительную погрешность измерения напряжений и токов не более $\pm 0,2\%$, и поскольку векторные измерения содержат в себе не только погрешность УСВИ, но и погрешность измерительных трансформаторов, то относительная погрешность зашумления несколько увеличена.

Рассматривалась задача определения состояния линий в 14-узловой тестовой схеме в любой момент переходного процесса. Для этого проведены расчеты с тремя вариантами входных данных, в качестве которых использовались изменения фаз напряжения в узлах и модулей токов в линиях через 0,1 с. Во всех трех вариантах в выходном слое СНС для каждой рассматриваемой линии значение 0 соответствовало тому, что линия находится в работе, а значение 1 – линия отключена.

Первый вариант. Количество входных параметров СНС равно 27, из них 7 значений напряжения, измеренных устройствами УСВИ в узлах, где они установлены, и 20 значений токов, измеренных УСВИ в линиях, инцидентных узлам расстановки УСВИ.

Использовались изменения значений измерений для одного временного интервала (один временной интервал – разница между измерениями в текущий и предыдущий моменты времени). Входом СНС является трехмерная матрица $1 \times 27 \times 1$.

Второй вариант. Использовались изменения значений измерений для двух последовательных временных интервалов. Количество входных параметров СНС равно 54. Входом СНС является трехмерная матрица $2 \times 27 \times 1$.

Третий вариант. Использовались изменения значений измерений от 1 до 20 временных интервалов. Количество входных параметров СНС варьировалось от 27 до 540 (27×20). Входами СНС являются трехмерные матрицы $n \times 27 \times 1$, где $n = 1, \dots, 20$.

Количество образцов для обучения и тестирования СНС варьировалось в зависимости от варианта расчетов и от количества временных срезов. Расчеты проводились по программе, разработанной на языке *Julia* (версия 1.4) с применением пакета *Flux* (библиотеки машинного обучения, включающей и функции для создания моделей СНС).

Таблица 1

Результаты определения топологии для двух вариантов входных данных СНС

Вариант	Данные (количество временных срезов при отключении и включении линии)	Количество образцов		Количество неверно классифицированных образцов при тестировании	Точность расчета, %
		для обучения	для тестирования		
1	1	6000	9000	0	100
	2	12000	18000	437	97,57
	3	18000	27000	1169	95,67
	4	24000	36000	4043	88,77
	5	30000	45000	5571	87,62
	6	36000	54000	7587	85,95
	7	42000	63000	9866	84,34
	8	48000	72000	10858	84,92
	9	54000	81000	11729	85,52
	10	60000	90000	13428	85,08
2	по 2 из 2	6000	9000	7	99,92
	по 2 из 3	12000	18000	347	98,07
	по 2 из 4	18000	27000	1209	95,52
	по 2 из 5	24000	36000	2110	94,14
	по 2 из 6	30000	45000	3150	93,00
	по 2 из 7	36000	54000	4463	91,55
	по 2 из 8	42000	63000	6256	90,07
	по 2 из 9	48000	72000	7582	89,47
	по 2 из 10	54000	81000	8011	90,11
	по 2 из 11	60000	90000	9486	89,46

Во всех вариантах расчетов для сверточных слоев использовали функцию активации *ReLU*. Классификация выполнялась с использованием логистической регрессии *softmax*. Для обновления весов при обучении СНС для всех протестированных вариантов применялась функция потерь – перекрестная энтропия, а в качестве функции оптимизации – *Adam* (алгоритм градиентной оптимизации стохастических целевых функций первого порядка).

Результаты расчетов с первыми двумя вариантами входных данных приведены в табл. 1 и табл. 2.

Анализируя точность расчетов и локализацию ошибок, можно сделать следующие выводы. Если проводить расчеты с данными более поздних относительно момента аварии временных срезов, то уменьшается точность, причем погрешность определения состояния линий растет для линий 115 кВ (линии 11-20) и остается допустимой для линий 230 кВ (линии 1-7). Это можно объяснить минимальным изменением фазы напряжения в узлах расстановки УСВИ по концам линий 115 кВ и небольшими перетоками по этим линиям. Для линий 230 кВ погрешность составляет менее 1% в расчетах со вторым вариантом данных (табл. 2).

Таблица 2

Распределение количества неверно классифицированных образцов при отключении / включении разных линий для двух вариантов входных данных СНС

Линия	Первый вариант расчета			Второй вариант расчета		
	Количество ошибок/относительная погрешность (%) при использовании данных:					
	2-х временных срезов	5-и временных срезов	10-и временных срезов	3-х временных срезов по 2	6-и временных срезов по 2	11-и временных срезов по 2
1	31 / 2,58	8/ 0,27	161/ 2,68	0 / 0	0 / 0	35 / 0,58
2	4 / 0,33	27/ 0,9	62/1,03	0/ 0	0 / 0	6 / 0,1
3	1 / 0,08	71/ 0	298/ 4,97	0 / 0	0 / 0	4 / 0,07
4	29/ 2,42	37/ 2,37	78/ 1,3	0 / 0	1 / 0,03	2 / 0,03
5	39 /3,25	72/ 2,4	230/ 3,83	0 / 0	0 / 0	6 / 0,1
6	38 / 3,17	52/1,73	385/ 6,42	0 / 0	1 / 0,03	25 / 0,42
7	40 / 3,33	11/ 0,37	35/ 0,58	0 / 0	0 / 0	0 /0
11	15 / 1,25	351/ 11,7	796/ 13,27	44 / 3,67	236 / 7,87	869 /14,48
12	59 / 4,92	1259/ 41,97	2928/48,8	61 / 5,08	783 / 26,1	2650 / 44,17
13	2 / 0,17	313/ 10,43	751/ 12,52	1 / 0,08	60 / 2,0	327 / 5,45
16	33 / 2,75	485/ 16,17	1412/ 23,53	12 / 1,0	119 / 3,97	936 / 15,6
17	7 /0,58	191/ 6,37	401/ 6,68	1 / 0,08	30 / 1,0	165 / 2,75
18	35 / 2,92	966/ 32,2	2073/34,55	52 / 4,33	584 / 19,47	1020 / 17,0
19	84 / 7,0	1443/ 48,1	2955/ 49,25	174 / 14,5	1024 / 34,13	2860 / 47,67
20	20 / 1,67	285/ 9,5	863/ 14,38	2 / 0,17	76 / 2,53	581 / 9,68
Количество тестируемых образцов для одной линии						
	1200	3000	6000	1200	3000	6000

Таблица 3

Точность результата определения состояния линии (отключена/включена) для третьего варианта входных данных СНС

Количество временных срезов	Размерность входных параметров	Точность результата, (%)	Количество временных срезов	Размерность входных параметров	Точность результата, (%)
1	1x27x1	100	11	11x27x1	100
2	2x27x1	99,92	12	12x27x1	99,99
3	3x27x1	99,66	13	13x27x1	99,49
4	4x27x1	100	14	14x27x1	99,91
5	5x27x1	99,98	15	15x27x1	99,96
6	6x27x1	100	16	16x27x1	99,94
7	7x27x1	99,97	17	17x27x1	99,07
8	8x27x1	99,99	18	18x27x1	99,72
9	9x27x1	100	19	19x27x1	99,26
10	10x27x1	99,99	20	20x27x1	99,77

Результаты расчетов с двумя первыми вариантами данных подсказали третий, особенность которого состоит в том, что на каждом временном срезе количество входных

данных увеличивается на 27, и на вход СНС подается матрица с количеством строк, увеличенным на единицу. Отсюда следует, что для каждого временного среза требуется своя архитектура СНС. Количество образцов для обучения и тестирования при этом не меняется (6000 – для обучения и 9000 – для тестирования). Точность определения изменения топологии сети, вызванного изменением состояния линии, для третьего варианта составляет почти 100 % (табл. 3).

Далее, в табл. 4 и 5 приведены архитектуры СНС для расчетов с данными одного и одиннадцати временных срезов. Количество слоев выделения признаков одинаково для обеих архитектур, но увеличение количества строк матрицы входных данных во втором случае позволило увеличить размерность ядра и для свертки, и для пулинга. Оба случая дают 100 % точность.

Таблица 4

Структурные параметры СНС для матрицы входных данных $1 \times 27 \times 1$

Слои	Действие	Размерность входа	Ядро	Размерность выхода
Первый слой выделения признаков	Свертка	$1 \times 27 \times 1$	1×2	$1 \times 26 \times 6$
	Пулинг	$1 \times 26 \times 6$	1×2	$1 \times 13 \times 6$
Второй слой выделения признаков	Свертка	$1 \times 13 \times 6$	1×2	$1 \times 12 \times 8$
	Пулинг	$1 \times 12 \times 8$	1×2	$1 \times 6 \times 8$
Слой классификации	Полносвязный слой	48	-	16

Таблица 5

Структурные параметры СНС для матрицы входных параметров $11 \times 27 \times 1$

Слои	Действие	Размерность входа	Ядро	Размерность выхода
Первый слой выделения признаков	Свертка	$11 \times 27 \times 1$	2×2	$10 \times 26 \times 36$
	Пулинг	$10 \times 26 \times 36$	2×2	$5 \times 13 \times 36$
Второй слой выделения признаков	Свертка	$5 \times 13 \times 36$	2×2	$4 \times 12 \times 14$
	Пулинг	$4 \times 12 \times 14$	2×2	$2 \times 6 \times 14$
Слой классификации	Полносвязный слой	168	-	16

Результаты и обсуждение

В данной работе, для определения состояния линий в 14-узловой тестовой схеме во время переходного процесса, рассмотрены три варианта входных данных сверточной нейронной сети.

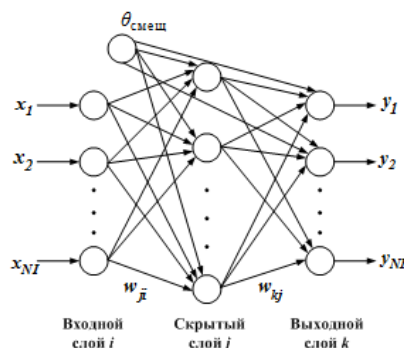


Рис. 6. Структура искусственной нейронной сети, используемой для определения изменения в топологии электрической сети

Сравним результаты, полученные с применением СНС, с результатами определения топологии с теми же вариантами входных данных на основе ИНС (рис. 6), полученными ранее (рассматриваются два варианта, поскольку третий относится только к схеме с СНС). Здесь $NI = 27$ (или 54, в зависимости от варианта расчетов); количество нейронов в

выходном слое $NK = 15$, что соответствует рассматриваемому количеству отключаемых линий в тестовой схеме.

В табл. 6 и 7 представлены результаты определения топологии электрической сети при изменении состояния одной из линий для схем с СНС и ИНС.

Таблица 6

Результаты определения топологии для двух вариантов входных данных СНС и ИНС

Вариант	Данные (количество временных срезов при отключении и включении линии)	Количество образцов		Количество неверно классифицированных образцов при тестировании		Точность расчета, %	
		для обучения	для тестиро вания				
СНС и ИНС				СНС	ИНС	СНС	ИНС
1	1	6000	9000	0	0	100	100
	2	12000	18000	437	432	97,57	97,60
	3	18000	27000	1169	1078	95,67	96,01
	4	24000	36000	4043	5616	88,77	84,40
2	по 2 из 2	6000	9000	7	0	99,92	100
	по 2 из 3	12000	18000	347	358	98,07	98,01
	по 2 из 4	18000	27000	1209	1185	95,52	95,61
	по 2 из 5	24000	36000	2110	5914	94,14	83,57

Таблица 7

Распределение количества неверно классифицированных образцов при отключениях / включениях разных линий для двух вариантов входных данных СНС и ИНС

Линия	Первый вариант		Второй вариант	
	Количество ошибок/относительная погрешность (%) при использовании данных:			
	2-х временных срезов		3-х временных срезов	
	СНС	ИНС	СНС	ИНС
1	31 / 2,58	0 / 0	0 / 0	0 / 0
2	4 / 0,33	1 / 0,08	0 / 0	1 / 0,08
3	1 / 0,08	0 / 0	0 / 0	0 / 0
4	29/ 2,42	3 / 0,25	0 / 0	0 / 0
5	39 / 3,25	3 / 0,25	0 / 0	0 / 0
6	38 / 3,17	2 / 0,17	0 / 0	0 / 0
7	40 / 3,33	3 / 0,25	0 / 0	0 / 0
11	15 / 1,25	52 / 4,33	44 / 3,67	32 / 2,67
12	59 / 4,92	87 / 7,25	61 / 5,08	69 / 5,75
13	2 / 0,17	4 / 0,33	1 / 0,08	10 / 0,83
16	33 / 2,75	24 / 2,00	12 / 1,0	5 / 0,42
17	7 / 0,58	16 / 1,33	1 / 0,08	11 / 0,92
18	35 / 2,92	49 / 4,08	52 / 4,33	93 / 8
19	84 / 7,0	182 / 15,17	174 / 14,5	130 / 10,83
20	20 / 1,67	6 / 0,50	2 / 0,17	4 / 0,33
Количество тестируемых образцов для одной линии				
	1200		1200	

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что точность модели с СНС выше, чем с ИНС, особенно когда определение изменения состояния линии происходит не в начале переходного процесса, а позже на несколько временных срезов. Для третьего варианта входных данных, которые можно обработать только на модели с СНС вследствие их большого объема, точность определения топологии сети не зависит от удаленности от начала переходного процесса.

Заключение

В этой работе предлагается решение определения изменения состояния линии в переходном режиме с помощью классификатора сверточных нейронных сетей, используя векторные измерения напряжения и тока в реальном времени. Подчеркивается важная роль совместного использования УСВИ и СНС при решении данной задачи. Возможность УСВИ записывать быстрые переходные процессы с высокой точностью в то же время

предоставляет большой объем данных, которые можно обработать пока только с помощью новейших алгоритмов машинного обучения и, в частности, сверточных нейронных сетей.

Получена высокая точность (вплоть до 100 %) определения состояния линии, независимо от зашумления данных. Изменение топологии сети определяется в самом начале переходного процесса практически мгновенно, что позволит оператору несколько раз в течение первых секунд идентифицировать состояние линии, чтобы убедиться в правильности принимаемых решений.

Дальнейшие направления исследований включают определение топологии сети, когда одновременно происходят изменения состояний двух или более линий.

Литература

1. Мокеев А.В. Особенности разработки, испытаний и внедрения устройств синхронизированных векторных измерений // Современные подходы к обеспечению надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар, 2014. С. 56–62.
2. Tate J.E., Overbye T.J. Line outage detection using phasor angle measurements // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. V. 23, N4. pp. 1644–1652.
3. Kim T., Wright S.J. PMU placement for line outage identification via multinomial logistic regression // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. V. 9, N1. pp. 122–131.
4. Cavarro G., Arghandeh R. Power distribution network topology detection with time-series signature verification method // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, N4. pp. 3500–3509.
5. Ponce C., Bindel D.S. FLiER: Practical topology update detection using sparse PMUs // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. V. 32, N6. pp. 4222–4232.
6. Srikumar M.S., Ananthapadmanbha Dr.T., Khan F.Z., et al. Line outage detection using phasor measurement units. In: Procedia Technology 21 (2015), SMART GRID Technologies; August 6–8; 2015. pp. 88–95.
7. Готман Н.Э., Шумилова Г.П., Старцева Т.Б. Идентификация топологии электрической сети на основе искусственных нейронных сетей с использованием векторных измерений // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66. Актуальные проблемы надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай, М.А. Короткевич, А.А. Михалевич. Минск: БНТУ, 2015. С. 251–257.
8. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Определение топологии электрической сети при делении ее на участки с привязкой к устройствам PMU // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 67. Проблемы надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай, Ю.Я. Чукреев. Сыктывкар: Издательство ООО «Коми республиканская типография», 2016. С. 250–255.
9. Готман Н.Э., Шумилова Г.П., Старцева Т.Б. Определение топологии электрической сети с использованием синхронизированных векторных измерений // Материалы Пятого Всероссийского научного семинара "Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера"; 21–23 сентября 2016 г., Сыктывкар. ООО «Коми республиканская типография», 2016. Ч. II. С. 115–123.
10. Cardoso P.E.A. Deep learning applied to PMU data in power systems: Ph.D. thesis. Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto. 2017. 105 p. Available at: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/106289/2/204483.pdf>. Accessed to: 21 Nov 2020.
11. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Networks. 2015. V. 61. pp. 85–117. doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
12. Shi H., Xu M.H., Li R. Deep learning for household load forecasting-A novel pooling deep RNN // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. V. 9, N5. pp. 5271–5280.
13. Wang H.Z., Ruan J.Q., Wang G., et al. Deep learning-based interval state estimation of AC smart grids against sparse cyber attacks // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. V. 14, N11. pp. 4766–4778.
14. Li W.T., Deka D., Chertkov M., et al. Real-time faulted line localization and PMU placement in power systems through convolutional neural networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. V. 34, N 6. pp. 4640–4651.
15. Muhammad A., Lee J.M., Hong S.W., et al. Deep learning application in power system with a case study on solar irradiation forecasting. In: Proceedings Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun. (ICAIIIC). Feb. 2019. pp. 275–279.
16. Zhang D., Xiaoqing H., Chunyu D. Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids // CSEE Journal of Power and Energy System. 2018. V. 4, N3. p.p. 362–370.

17. Xiao M., Wang S., Ullah Z., et al. Topology detection in power distribution system using kernel-node-map deep networks // IET Gener., Transm. Distrib. 2020. V. 14, N19. p. 4033–4041. doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0048.
18. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Networks. 2015. V. 61. pp. 85–117. doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.00319.
19. Haykin Simon. Neural networks: a comprehensive foundation. Second edition. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд., испр. / пер. с англ. М: ООО «И.Д.Вильямс». 2006. 1104 с.
20. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017, Т.6, № 3. С. 28–59.
21. Patterson Josh, Gibson Adam. Deep Learning. A practitioner's approach. Паттерсон Дж., Гибсон А. Глубокое обучение с точки зрения практика / пер. с англ. М.: ДМК Пресс. 2018. 418 с.
22. Хохлов М.В., Голуб И.И. Унифицированный подход к оптимизации размещения РМУ в сети для обеспечения надежности наблюдаемости ЭЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Надежность либерализованных систем энергетики /Отв. ред. Н.И. Воропай, А.Н. Назарычев. Иркутск. 2015. № 65. С. 591–601.

Авторы публикации

Готман Наталья Эрвиновна — научный сотрудник отдела энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми, «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Сыктывкар, Россия. E-mail: gotman@energy.komisc.ru.

Шумилова Галина Петровна — канд.техн.наук., старший научный сотрудник отдела энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми, «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Сыктывкар, Россия. E-mail: shumilova@energy.komisc.ru.

References

1. Mokeyev AV. Development, testing and Introduction Features of Phasor Measurement Units. *Modern approaches to power system reliability support*. Syktyvkar, 2014. pp. 56-62.
2. Tate JE, Overbye TJ. *Line outage detection using phasor angle measurements*. IEEE Transactions on Power Systems. 2008;23(4):1644–1652.
3. Kim T, Wright SJ. *PMU placement for line outage identification via multinomial logistic regression*. IEEE Transactions on Smart Grid. 2018;9(1):122–131.
4. Cavarro G, Arghandeh R. *Power distribution network topology detection with time-series signature verification method*. IEEE Transactions on Power Systems. 2018;33(4):3500-3509.
5. Ponce C, Bindel DS. FLIER: *Practical topology update detection using sparse PMUs*. IEEE Transactions on Power Systems. 2017;32(6):4222–4232.
6. Srikumar MS, Ananthapadmanbha Dr.T, Khan F.Z, et al. Line outage detection using phasor measurement units. In: *Procedia Technology 21 (2015), SMART GRID Technologies*; August 6–8; 2015. pp. 88–95.
7. Gotman NE, Shumilova GP, Startseva TB. Identifikatsiya topologii elektricheskoy seti na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey s ispol'zovaniyem vektornykh izmereniy In: *Rudenko International Conference Metodological problems in reliability study of large energy systems* Vyp. 66. Aktual'nyye problemy nadezhnosti sistem energetiki; 7-11 Sen 2015; Minsk, Byelorussia. Minsk: BNTU, 2015. pp. 251-257.
8. Shumilova GP, Gotman NE, Startseva TB. Opredeleniye topologii elektricheskoy seti pri delenii yeye na uchastki s privyazkoy k ustroystvam PMU. In: *Rudenko International Conference Metodological problems in reliability study of large energy systems* Vyp. 67. Problemy nadezhnosti sistem energetiki; 4-9 Jul 2016; Syktyvkar, Russia. Syktyvkar: ООО «Кomi respublikanskaya tipografiya», 2016. pp. 250-255.
9. Gotman NE, Shumilova GP, Startseva TB. Opredeleniye topologii elektricheskoy seti s ispol'zovaniyem sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy. In: *Pyatoy Vserossiyskiy nauchnyy seminar «Aktual'nyye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditel'nykh sil Severa»*. 21-23 Sen 2016; Syktyvkar, Russia. Syktyvkar: ООО «Кomi respublikanskaya tipografiya», 2016;2:15-123.
10. Cardoso P.E. A deep learning applied to PMU data in power systems: Ph.D. thesis. Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto. 2017. 105 p. Available at: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/106289/2/204483.pdf>. Accessed to: 21 Nov 2020.

11. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Networks*. 2015;61:85–117. doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
12. Shi H, Xu M.H, Li R. Deep learning for household load forecasting-A novel pooling deep RNN // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017;9(5):5271–5280.
13. Wang H.Z, Ruan JQ, Wang G, et al. *Deep learning-based interval state estimation of AC smart grids against sparse cyber attacks*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(11):4766–4778.
14. Li WT, Deka D, Chertkov M, et al. *Real-time faulted line localization and PMU placement in power systems through convolutional neural networks*. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(6):4640–4651.
15. Muhammad A, Lee JM, Hong S.W, et al. *Deep learning application in power system with a case study on solar irradiation forecasting*. In: *Proceedings Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun. (ICAIIC)*. Feb. 2019. pp. 275–279.
16. Zhang D, Xiaoqing H, Chunyu D. Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids. *CSEE Journal of Power and Energy System*. 2018;4(3):362–370.
17. Xiao M, Wang S, Ullah Z, et al. *Topology detection in power distribution system using kernel-node-map deep networks*. *IET Gener., Transm. Distrib.* 2020;14(19):4033–4041. doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0048.
18. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Networks*. 2015;61:85–117. doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.00319.
19. Haykin Simon. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Second edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458. 1998 (Russ. ed.: Khaykin S. Neyronnyye seti: polnyy kurs. 2-ye izd., ispr. / per. s angl. Moscow: OOO «I.D.Vil'yams». 2006; 1104 p.
20. Sozykin AV. Obzor metodov obucheniya glubokikh neyronnykh setey. *Bulletin of the South Ural State University Series «Computational Mathematics and Software Engineering»*. 2017;6(3):28–59. doi: 10.14529/cmse170303.
21. Patterson Josh, Gibson Adam. *Deep Learning. A practitioner's approach*. Patterson Dzh., Gibson A. *Glubokoye obucheniye s točki zreniya praktika* / per. s ang. Moscow: DMK Press., 2018; 418 p.
22. Khokhlov MV, Golub II. Unifitsirovanny podkhod k optimizatsii razmeshcheniya PMU v seti dlya obespecheniya nadezhnosti nablyudayemosti EES. In: *Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems»*. Nadezhnost' liberalizovannykh sistem energetiki; 30 Jun-04 Jul 2014; Saint-Petersburg, Russia: Irkutsk: ISEM SO RAN, 2015;65:251-257.

Authors of the publication

Natalia E. Gotman – Federal Research Center "Komi Scientific Center of the Ural Branch Russian Academy of Sciences", ISE and EPN, Syktyvkar, Russia. Email: iespn@ksc.komisc.ru.

Galina P. Shumilova – Federal Research Center "Komi Scientific Center of the Ural Branch Russian Academy of Sciences", ISE and EPN, Syktyvkar, Russia. Email: iespn@ksc.komisc.ru.

Получено

24 ноября 2020 г.

Отредактировано

15 декабря 2020 г.

Принято

15 декабря 2020 г.



РАЗРАБОТКА ПРЯМОТОЧНОЙ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

М.А. Таймаров, Е.Г. Чикляев

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
tvt_kgeu@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть возобновляемый источник энергии. Сравнить предлагаемую конструкцию с другими пиролизными технологиями и убедиться в том, что предлагаемая конструкция снизит расход топлива. МЕТОДЫ. В данной статье предлагается конструкция и технологический принцип процесса пирогенетической переработки древесины с выработкой различных составов пиролизного газа и древесного угля. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана предлагаемая конструкция, для нее произведены расчеты теплового баланса и определены эксплуатационные параметры технологического процесса. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Главным положительным отличием предлагаемой конструкции установки и технологии от других пиролизных технологий является высокий уровень экономии топлива за счет утилизации теплоты на промежуточных стадиях процесса. Утилизируется теплота охлаждаемого древесного угля и уходящих продуктов полного сгорания топлива. Разработанная конструкция позволяет снизить расход топлива, а так же номенклатура получаемых газообразных компонентов в результате пирогенетического разложения сырьевой древесины в прямоточной пиролизной установке может быть увеличена.

Ключевые слова: Древесина, пиролиз, пирогенетический, прямоточный, разложение, температура, непрерывный, уголь, пиролизный газ, технология.

Для цитирования: Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.

DEVELOPMENT OF A DIRECT FLOW PYROLYSIS PLANT FOR PYROGENETIC DECOMPOSITION OF WOOD

MA. Taimarov, EG. Chiklyayev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
tvt_kgeu@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Consider a renewable energy source. Compare the proposed design with other pyrolysis technologies and make sure that the proposed design will reduce fuel consumption. METHODS. This article proposes the design and technological principle of the process of pyrogenetic wood processing with the production of various compositions of pyrolysis gas and charcoal. RESULTS. The article describes the proposed design, calculates the heat balance for it, and determines the operational parameters of the technological process. CONCLUSION. The main positive difference between the proposed plant design and technology from other pyrolysis technologies is a high level of fuel economy due to heat utilization at intermediate stages of the process. The heat of the cooled charcoal and the waste products of complete fuel combustion are utilized. The developed design allows reducing fuel consumption, as well as the range of gaseous components obtained as a result of pyrogenetic decomposition of raw wood in a direct-flow pyrolysis plant can be increased.

Keywords: Wood, pyrolysis, pyrogenetic, direct-flow, decomposition, temperature, continuous, coal, pyrolysis gas, technology.

For citation: Taimarov MA, Chiklyayev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.

Введение

Пиролиз древесины для выработки пиролизного газа и угля является приоритетным направлением в лесохимическом использовании возобновляемых источников углеводородного сырья [1-4]. Имеется достаточное количество конструкций пиролизных установок, характеризующихся различным температурным уровнем процесса химико-термического разложения древесины, удельным расходом топлива, количеством получаемых компонентов в составе пиролизного газа, производительностью. Главными показателями эффективности работы установок служат эффективность использования топлива и производительность по выпуску качественных компонентов, пригодных для использования в качестве заменителей углеводородных соединений для нефтехимии, которая отличается крупнотоннажным производством. Поэтому разработка конструкций пиролизных установок с высокой производительностью, которой посвящена данная статья, является актуальным и востребованным направлением в области создания новых технологий пирогенетического разложения древесины.

Описание объекта исследования

Выпускаемые промышленностью известные установки для пиролиза древесины, как правило, имеют периодическое действие, связанное с загрузкой древесного сырья и выгрузкой угля. Их особенностью является также раздельное выполнение технологических операций, связанных с сушкой древесины, предварительным нагревом загруженного древесного сырья, охлаждение выгруженного угля [5]. По целевому назначению большинство выпускаемых промышленностью пиролизных установок пирогенетического разложения древесины предназначены для получения древесного угля. В таких технологиях пиролизный газ является побочным продуктом с невысокой теплотой сгорания. Значительные потери теплоты сжигаемого топлива связаны с подогревом воздуха, подаваемого на горение. Эти два последних недостатка характерны также для установок пирогенетического разложения древесины непрерывного действия, выпуск которых также в небольшом количестве освоен промышленностью. В разработанной конструкции указанные недостатки устранены путем отделения топki от реторты, в которой происходит пиролиз древесины, и от камеры сушки. Нагрев воздуха, подаваемого в топочную камеру, происходит за счет отводимой от охлаждаемого угля теплоты. Схема разработанной прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины приведена на рис. 1.

Герметичный люк 1 (см. рис. 1) служит для загрузки сырьевой предварительно измельченной древесины, предназначенной для получения из нее древесного угля. Через герметичный люк 2 загружается предварительно измельченная топливная древесина, из которой при сжигании вырабатывается теплота для нагрева камеры сушки 5 и камеры пиролиза 11. На стадии сушки из сырьевой древесины 3 удаляется влага путем нагрева в герметичной камере сушки 5. Пары воды отводятся по трубе 27 в дымовую теплоизолированную трубу 26. Таким образом, в составе одной установки имеется камера сушки 5, использующая теплоту от топочной камеры 4.

В топочной камере 4 сжигается топливная древесина 6 и получаемая теплота передается через стенку камеры пиролиза 11 нагреваемой сырьевой древесине 10. Конструктивно топочная камера 4 расположена коаксиально по отношению к цилиндрической камере пиролиза 11. [6-7].

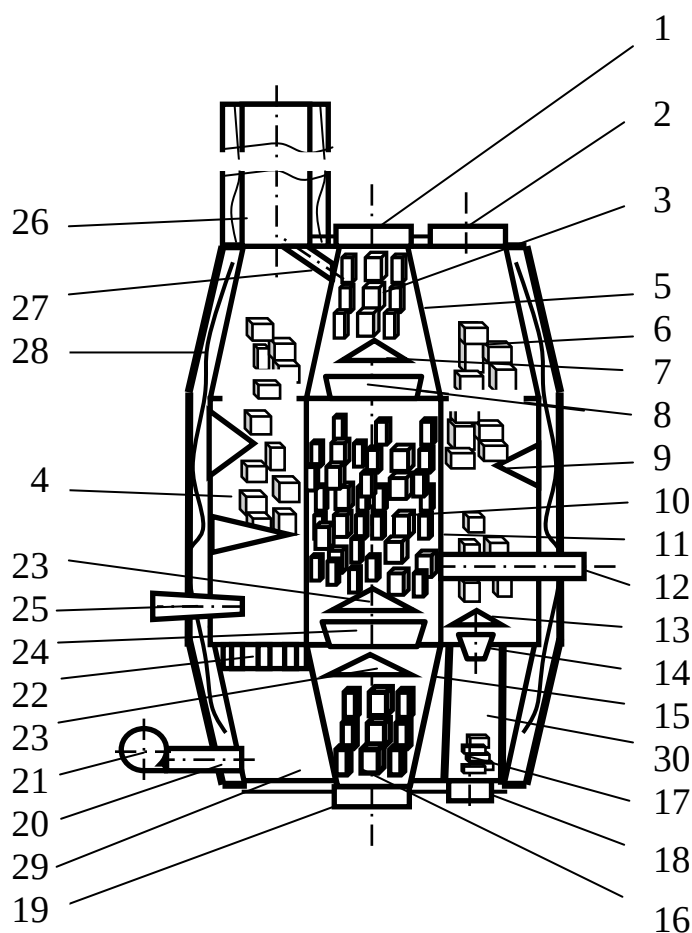


Рис. 1. Схема прямооточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины: 1-люк для загрузки сырьевой древесины, 2- люк для загрузки топливной древесины, 3- сырьевая древесина на стадии сушки, 4 – топочная камера, 5 – камера сушки, 6 – топливная древесина, 7 – конус для загрузки сухой древесины, 8 – сушильный разделяющий конус, 9 – распределительные ребра, 10 - сырьевая древесина на стадии пиролиза, 11- камера пиролиза, 12 – труба отвода пиролизных газов, 13 – конус для выгрузки золы, 14 – зольный разделяющий конус, 15 – камера охлаждения угля, 16 – уголь на стадии охлаждения, 17 - зола, 18 – люк для удаления золы, 19 - люк для удаления угля, 20 – труба подачи воздуха, 21 - дутьевой вентилятор, 22 - колосник, 23 – конус для выгрузки угля, 24 – пиролизный разделяющий конус, 25 – растопочная горелка, 26 – дымовая труба, 27 – труба удаления водяного пара, 28 – тепловая изоляция, 29 – форкамера, 30 – зольный отсек

Топливная древесина 6 в измельченном виде используется в разработанной установке путем прямого сжигания в топочной камере 4 в качестве топлива. Конус 7 для загрузки сухой древесины является подвижным элементом и служит подачи высушенной древесины 3 в камеру пиролиза 11. Сушильный разделяющий конус 8 служит для отделения объема камеры сушки 5 от объема камеры пиролиза 11. Для загрузки высушенной древесины 3 из камеры сушки 5 в камеру пиролиза 11 разделяющий конус 8 посередине имеет проходное отверстие, которое на стадии сушки древесины 3 закрыто конусом 7. При этом камера сушки 5 и камера пиролиза 11 герметично разобщены. Наличие разделяющего конуса 8, который за исключением непродолжительного по времени периода загрузки высушенной древесины 3 в камеру пиролиза 11, закрыт конусом 7 является отличительным признаком разработанной конструкции по сравнению с известными конструкциями пиролизных установок выпускаемых промышленностью.

Распределительные ребра 9 выравнивают слой топливной древесины 6 по объему топочной камеры 4. С помощью распределительных ребер 9 достигается равномерная циркуляция нагретых продуктов сгорания топлива в топочной камере 4 для передачи теплоты по высоте камеры пиролиза 11. Сырьевая древесина 10 под действие высокой

температуры, получаемой за счет внешнего повода теплоты через стенку камеры пиролиза 11, подвергается пирогенетическому разложению без доступа воздуха.

Труба 12 отвода пиролизных газов соединена с внутренним объемом камеры пиролиза 11 и предназначена для подачи пиролизного газа внешним потребителям. Непосредственно в технологическом рабочем режиме для обеспечения процесса пирогенетического разложения древесины 10 получаемый пиролизный газ не используется.

Подвижный конус 13 служит для выгрузки золы 17, образующейся при сгорании топливной древесины 6 в топочной камере 4. Неподвижный зольный разделяющий конус 14 отделяет зольный отсек 30 от топочной камеры 4. При отсутствии выгрузки золы из топочной камеры 4 конус 13 герметично перекрывает проходное отверстие зольного разделяющего конуса 14. В камере 15 происходит охлаждение нагретого угля, выгруженного из камеры пиролиза 11. Теплота нагретого угля 16 передается через стенку к нагреваемому воздуху, поступающему по трубе 20 от дутьевого вентилятора 21. Нагретый воздух через колосник 22 поступает на горение топливной древесины 6.

Древесный уголь 16 является конечным твердым продуктом термохимического разложения сырьевой древесины 3 в камере пиролиза 11. Отводимая от него теплота используется непосредственно в самой установке в топочной камере 4. Зола 17 является конечным твердым продуктом от сжигания топливной древесины 6 и периодически удаляется из зольного отсека 30 при помощи герметичного люка 18. Теплота, выделяемая золой 17 за время пребывания в зольном отсеке 30, передается через стенку нагреваемому воздуху, находящемуся в форкамере 29. Люк 19 служит для выгрузки охлажденного угля 16 из камеры охлаждения 15.

Колосник 22 предотвращает провал золы из топочной камеры 4 в форкамеру 29. Подвижные конусы 23 служат для периодической выгрузки древесного угля из камеры пиролиза 11 в камеру охлаждения 15 через проходное отверстие в разделяющем конусе 24. С помощью конусов 23 инеподвижного пиролизного разделяющего конуса 24 также происходит герметичное отделение камеры пиролиза 11 от камеры охлаждения 15 при отсутствии выгрузки угля. При герметизации верхний конус 23 опускается, а нижний конус 23 при этом поднимается и происходит перекрытие проходного отверстия в разделяющем конусе 24.

Комбинированная растопочная горелка 25 предназначена для первичного воспламенения топливной древесины 6 в топочной камере 4 за счет факела, получаемого от сжигания газообразного или жидкого топлива. После воспламенения топливной древесины 6 в топочной камере 4 горелка 25 отключается. Тепловая изоляция 28 служит для предотвращения теплопотерь топочной камеры 4 и пиролизной камеры 11 от наружного охлаждения. Форкамера 29 предназначена для создания объема воздуха, нагреваемого за счет теплоты, отводимой от угля 16 и золы 17, перед подачей его в топочную камеру 4. Форкамера 29 расположена снаружи вокруг камеры охлаждения угля 15 и вокруг зольного отсека 30.

Зольный отсек 30 служит для промежуточного хранения нагретой золы 17 при отдаче ее теплоты нагреваемому воздуху, находящемуся в форкамере 29. Открытие и закрытие люков 1, 2, 18, 19, перемещение конусов 7, 13, 23 осуществляется при помощи механизмов с электрическими сервоприводами от миникомпьютера по программе в автоматическом режиме.

Пиролизная установка работает следующим образом. Заранее измельченная сырьевая древесина 3 размером кусков не более 80х80х80 мм через люк 1 загружается в камеру сушки 5 при опущенном конусе 7 и закрытом с его помощью разделяющем конусе 8. После загрузки древесины 3 люк 1 герметично закрывается. Закрытыми также являются пиролизный разделяющий конус 24, зольный конус 14, люки 2, 18 и 19.

Через люк 2, после его открытия, загружается измельченная топливная древесина 6 с размером кусков не более 80х80х80 мм. После загрузки древесины 6 люк 2 герметично закрывается. При помощи распределительных ребер 9 при загрузке происходит выравнивание укладки древесины 6 в топочной камере 4. Включается дутьевой вентилятор 21 и через трубу 20, форкамеру 29, через колосник 22 подается воздух в топку 4.

Включается подача вспомогательного топлива в растопочную горелку 25 и производится его электрическое воспламенение. За счет получаемого факела от горения вспомогательного топлива происходит слоевое воспламенение топливной древесины 6. После слоевого воспламенения топливной древесины 6 подача вспомогательного топлива в растопочную горелку 25 прекращается. За счет выделяющейся при горении топливной древесины 6 теплоты производится прогрев камеры пиролиза 11 и сушка сырьевой древесины 3 в камере сушки 5.

Образующаяся от сгорания топливной древесины 6 нагретая зола за счет движения воздуха, непрерывно подаваемого в топочную камеру 4 через отверстия в колоснике 22, скапливается на конусе 13 и на входе разделяющего конуса 14. После накопления определенной массы золы, периодически в автоматическом режиме сервоприводом от миникомпьютера конус 13 приподнимается вверх и через освобожденное проходное отверстие разделяющего конуса 14 зола 17 воздухом проталкивается в зольный отсек 30. После перемещения золы 17 конус 13 опускается и герметично закрывает проходное отверстие разделяющего конуса 14.

Зола 17 в зольном отсеке 30 охлаждается путем отдачи теплоты через стенку воздуху, который находится в форкамере 29 и затем поступает в топочную камеру 4. После охлаждения золы 17, люк 18 открывается, и зола удаляется из зольного отсека 30. Затем происходит герметичное закрытие люка 18. После удаления влаги из сырьевой древесины 3, конус 7 приподнимается, освобождая проходное отверстие разделяющего конуса 8, и высушенная древесина поступает в камеру пиролиза 11, стенка которой уже прогрета за счет теплоты, подведенной от сгоревшей топливной древесины 6.

После загрузки камеры пиролиза 11 древесиной 10, конус 7 опускается вниз и герметично перекрывает проходное отверстие разделяющего конуса 8. Затем открывается люк 1 и загружается новая порция сырьевой древесины 3 для удаления из нее влаги. После загрузки древесины 3 люк 1 герметично закрывается и древесина 3 подвергается нагреву за счет подведенной теплоты от сгорания топливной древесины 6. Образующиеся при сушке пары воды непрерывно удаляются через трубу 27 в дымовую трубу 26 за счет ее самотяги. Подача новой порции топливной древесины 6 взамен сгоревшей происходит периодически путем открытия люка 2.

В камере 11 после прогрева древесины 10 наступает процесс ее пиролизного разложения без доступа воздуха. Выделяющийся под действие высокой температуры при термохимическом разложении древесины высококондиционный пиролизный газ под избыточным давлением поступает через трубу 12 к внешним потребителям и в рабочем режиме в разработанной установке в виде топлива не используется. После завершения процесса пиролиза и выделения пиролизного газа механизмом с электрическим сервоприводом поднимается верхний конус 23 и опускается нижний конус 23 и через освободившееся проходное отверстие разделяющего конуса 24 происходит удаление древесного угля 16 в камеру охлаждения 15. Перемещение верхнего конуса 23 происходит в колебательном режиме и высота подъема зависит от размера кусков образовавшегося угля 16.

После удаления угля 16 из камеры 11 проходное отверстие конуса 24 герметично перекрывается конусами 23, а в освободившийся объем подается древесина 3 из камеры 5. В освободившийся объем камеры 5 через люк 1 подается новая порция древесины 3 для сушки. От нагретого угля 16 через стенку камеры 15 отводится теплота к подаваемому вентилятором 21 на горение топлива 6 воздуху, который поступает в топочную камеру 4 уже подогретым за счет отведенной от охлаждаемого угля 16 теплоты.

После охлаждения уголь из камеры 15 удаляется путем открытия люка 19, который затем герметично закрывается. По мере сгорания топливной древесины 6 в камере 4 новая порция древесины загружается периодически через люк 2. Далее все процессы функционирования пиролизной установки повторяются. [8-10]

Результаты

Для разработанной конструкции пиролизной установки произведены расчеты теплового баланса и определены эксплуатационные параметры технологического процесса с учетом получаемых конечных продуктов при различных режимах работы. Тепловой баланс пиролизной установки для пиролизного разложения сосновой древесины с влажностью 25 % приведен в табл. 1.

Таблица 1

Тепловой баланс пиролизной установки, рассчитанный на 1 кг подвергаемой пиролизу сырьевой древесины с влажностью 25 %.

Приход			Расход		
Показатель	Значение		Показатель	Значение	
	МДж/кг	%		МДж/кг	%
Затрата теплоты топливной древесины	2,6	100	Расход теплоты на пирогенетическое разложение сырьевой древесины q_p	2,45	94,23
			Потеря теплоты с уходящими дымовыми газами от горения топливной древесины	0,08	3,08
			Потеря теплоты от наружного охлаждения	0,04	1,54
			Потеря с физической остаточной теплотой золы, угля, пиролизного газа и водяного пара	0,03	1,15
Итого	2,6	100	Итого	2,6	100

Расчет расхода теплоты на пирогенетическое разложение 1 кг сырьевой древесины выполнен по формуле [16]

$$q_p = \frac{0,001t_m(96W_c + 5,3t_n + 35k - 820)}{t_m - t_n} \text{ МДж/кг,} \quad (1)$$

Где t_m и t_n – температура продуктов сгорания в топочной камере 4 и температура пиролизных газов на выходе из трубы 12 (см. рис. 1), °С; W_c – влажность сырьевой древесины, поступающей в камеру пиролиза, %; k – коэффициент теплопередачи через стенку камеры пиролиза, Дж/(м²×°С).

Значение расхода теплоты на пирогенетическое разложение 1 кг сырьевой древесины q_p , приведенное в табл.1, получено при следующих параметрах процесса: t_m = 600°С, t_n = 150°С, W_c = 25% с учетом снижения влажности на 6 % за счет сушки сырьевой древесины в камере сушки 5 (см. рис. 1), k = 1 Дж/(м²×°С).

Определение массового расхода и потерь теплоты осуществляется исходя из следующих характеристик топливной древесины. Низшая теплота сгорания в рабочей массе 1 кг топливной древесины Q_n^p (МДж/кг) в зависимости от ее влажности W_c (%) может быть определена по зависимости:

$$Q_n^p = 18 - 0,146 \times W_c \text{ МДж/кг,}$$

Под влажностью W_c понимается масса воды в древесине, поделенная на массу сухого остатка и выраженная в процентах. При сгорании 1 кг сухой древесины удельное массовое выделение водяных паров в среднем составляет $d_v = 0,567$ кг/кг. Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг сухой топливной древесины $V_T^B = 5,2$ нм³/кг.

Преимуществом сушки сырьевой древесины в камере сушки 5 (см. рис. 1) является отвод испаряемой влаги по трубе 27 в дымовую трубу 26 с выбросом в атмосферу. В дымовой теплоизолированной трубе 26 температура внутренних стенок выше 80°С и конденсат не образуется. Поэтому в конструкции установки (см. рис. 1) возможно осуществление охлаждения дымовых газов от сгорания топлива до температур в диапазоне от 80°С до 100°С. В существующих вертикальных промышленных пиролизных установках камера сушки отсутствует и сырьевая древесина загружается сразу в камеру пиролиза. Испаряемая влага не удаляется из камеры пиролиза и в качестве газообразного балласта присутствует в составе пиролизного газа.

Основной расход теплоты при пирогенетическом разложении сырьевой древесины q_p связан с величиной содержания в ней влаги. На рис. 2 приведена зависимость расхода теплоты q_p на пирогенетическое разложение сырьевой древесины при различных значениях влажности древесины W_c , температурах в топочной камере t_m и температурах пиролизных газов t_n .

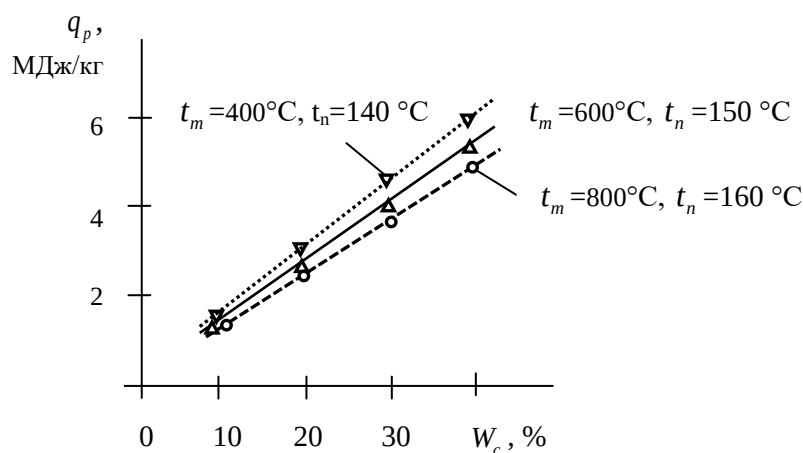


Рис. 2. Зависимость расхода теплоты q_p на пирогенетическое разложение 1 кг сырьевой древесины при различных значениях влажности древесины W_c , температурах в топочной камере t_m и температурах пиролизных газов t_n .

Из рис. 2 видно, что увеличение содержания влаги в сырьевой древесине на 10 % оказывает большее влияние на возрастание потребления теплоты q_p по сравнению с увеличением температуры в топочной камере t_m на 200°C . Поэтому применение в разработанной конструкции камеры сушки 5 является эффективным техническим решением для оптимизации процесса пиролиза.

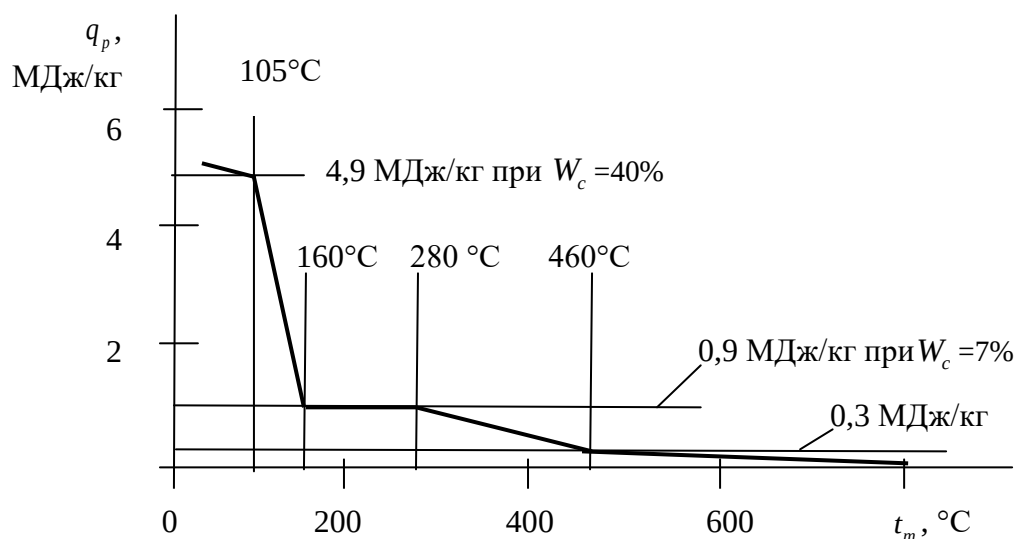


Рис.3. Зависимость расхода теплоты q_p по температурным интервалам процесса пирогенетического разложения древесины при температуре в топке $t_m = 800^\circ\text{C}$.

На рис.3. с использованием экспериментальных данных работы [11-12], построена зависимость расхода теплоты q_p для температурных интервалов процесса пирогагенетического разложения древесины при температуре в топке $t_m = 800^\circ\text{C}$.

На рис. 3 можно выделить 4 температурных области процесса пиролиза.

Первая область до температуры 160°C состоит из процесса сушки древесины с различной влажностью после камеры сушки 5 (см. рис. 1). Расход теплоты на процесс от температуры сырьевой древесины в камере сушки 105°C до достижения температуры 160°C в камере пиролиза 11 (см. рис. 1) определяется как разность Δq_p при 105°C и 160°C . Для влажности, указанной на рис. 3, на 1 кг сырьевой древесины $\Delta q_p = 4 \text{ МДж/кг}$.

Вторая область свыше 160°C до 280°C характеризуется подводом теплоты извне и представляет собой начало разложения древесины и сопровождается распадом нестойких компонентов древесины, выделением диоксида и оксида углерода.[13-14]

Третья область свыше 280°C до 460°C характеризуется большим выделением теплоты вследствие экзотермического процесса пирогагенетического разложения сырьевой древесины с тепловым эффектом $0,9 \text{ МДж/кг}$ и выделением пиролизного газа и смолы. Однако тепловой эффект проявляется только при непосредственном разложении древесины. Чем медленнее происходит процесс пирогагенетического разложения, тем выше его экзотермичность. Количество потребляемой извне теплоты от сжигания топливной древесины сильно уменьшается.

Четвертая область свыше 460°C до 800°C состоит из прокаливания древесного остатка за счет подводимой извне теплоты с образованием конечного продукта – древесного угля и остаточным выделением тяжелой смолы.

Как видно из рис. 3, на собственно процесс пирогагенетического разложения 1 кг сырьевой древесины расход подводимой извне теплоты $\Delta q_p = 0,6 \text{ МДж/кг}$. Эффективность процесса пирогагенетического разложения сырьевой древесины 10 в камере пиролиза 11 зависит от скорости подвода теплоты из топочной камеры 4 (см. рис. 1).

Изменение скорости нагрева сырьевой древесины от начальной температуры до температуры завершения пирогагенетического разложения приводит к качественному и количественному смещению температурных областей процесса приведенных на рис. 3.

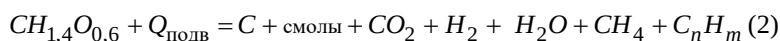
Медленный нагрев приводит к смещению температурных диапазонов в область более низких значений, а увеличение скорости нагрева перемещает их в область более высоких значений.

При соответствующих конструктивных параметрах топочной камеры 4, камеры сушки 5, камеры пиролиза 11 и камеры охлаждения угля 15 в разработанной прямоточной пиролизной установке (см. рис. 1) могут быть реализованы следующие технологические виды режимов пирогагенетического разложения сырьевой древесины 10.

Режим медленного пиролиза, заключающийся в термохимической деструкции сырьевой древесины без доступа воздуха, при котором скорость нагрева древесины составляет $1-15^\circ\text{C/мин}$.

Режим быстрого пиролиза, заключающийся в термохимической деструкции сырьевой древесины без доступа воздуха, при котором скорость нагрева древесины составляет $200-600^\circ\text{C/мин}$.

Из предпосылки [15], что химический состав сырьевой древесины описывается формулой $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$, реакция пирогагенетического разложения древесины может быть выражена как:



где C - углеводный остаток, $Q_{\text{подв}}$ – подведенная теплота к сырьевой древесине в камере пиролиза 11 (см. рис. 1).

В зависимости от количества и скорости подведения теплоты $Q_{\text{подв}}$, то есть от вида режима пиролиза, в правой части уравнения (2) получается необходимая номенклатура компонентов пирогагенетического разложения древесины.

На рис.4 для 1 кг сырьевой древесины приведена зависимость скорости подвода теплоты в виде произведения Δq_p по различным температурным интервалам и величины этих интервалов Δt_m процесса пирогагенетического разложения древесины.

Из рис. 4 видно, что интенсивность подвода теплоты в диапазоне температур от 160°C до 460°C невысокая процесс пирогенетического разложения древесины идет в режиме медленного пиролиза, конечным продуктом которого является древесный уголь.

Для осуществления перехода к режиму быстрого пиролиза требуется увеличить количество подводимой теплоты от сжигания топливной древесины в диапазоне температур от 160°C до 460°C. Это может быть достигнуто путем снижения расхода теплоты на сушку древесины в области температур от 80°C до 160°C за счет загрузки в камеру сушки 5 (см. рис. 1) сырьевой древесины с влажностью 10 %.

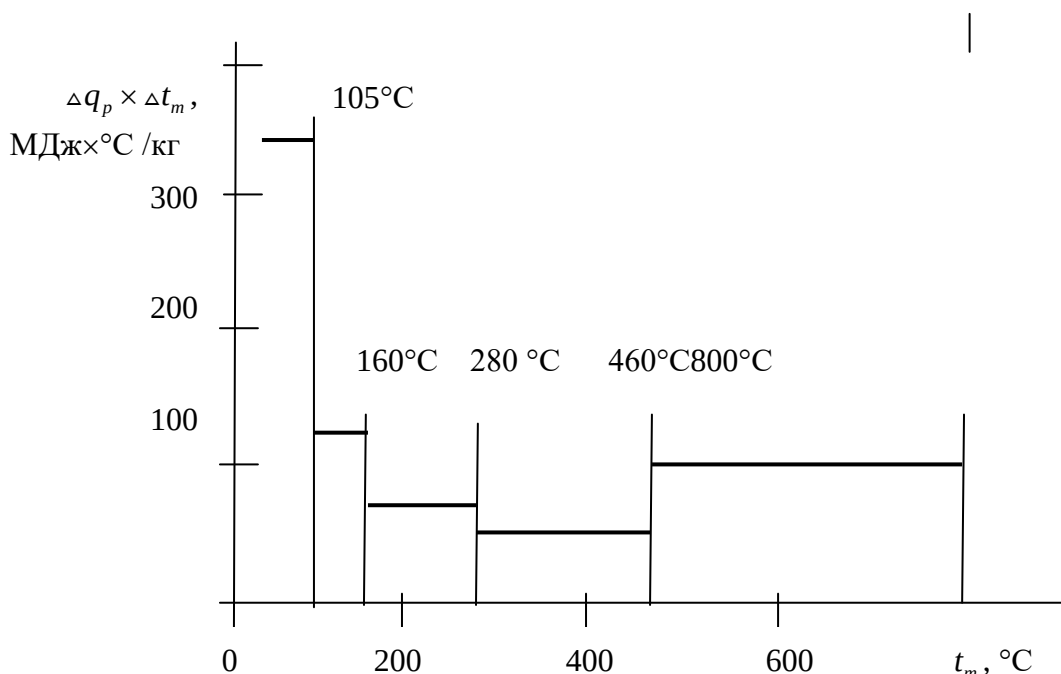


Рис.4. Величина $\Delta q_p \times \Delta t_m$ по различным температурным интервалам процесса пирогенетического разложения 1 кг сырьевой древесины

За счет дополнительного подвода теплоты верхний температурный диапазон с 460°C сдвинется в область температур 550°C...600 °C с увеличением количества получаемых газообразных углеводородов и уменьшением количества получаемого древесного угля.

Выводы

1. Разработанная конструкция прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины позволяет снизить расход топлива путем дополнительного удаления влаги из сырьевой древесины в камере сушки за счет утилизации теплоты уходящих газов от сгорания топлива.

2. Номенклатура получаемых газообразных компонентов в результате пирогенетического разложения сырьевой древесины в прямоточной пиролизной установке может быть увеличена за счет применения быстрого пиролиза путем снижения влажности сырьевой древесины на входе в камеру пиролиза и увеличения подвода теплоты из топки в температурном диапазоне от 160°C до 460°C.

Литература

1. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г., Касимова Л.И. Получение водорода из вторичной древесины. В сб. статей Международной научно-практической конференции «Наука в современном обществе: закономерности и тенденции развития». Аэтерна, Магнитогорск. 2018. С. 44 -47.
2. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г., Касимова Л.И. Пирогенетическая переработка древесины при переменных параметрах процесса. В сб. статей Международной научно-практической конференции «Технологическая кооперация науки и производства: новые идеи и перспективы развития. Аэтерна, Тюмень, 2018. С. 64-67
3. Beckmann M., Klepmann F., Martin J., Scholz R. / Classification of Waste-to-energy Plants in Terms of Energy Recovery//VGB Power Tech. 2017. № 10. P. 76-81.

4. Francois J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // *Chemical engineering transactions*. 2016. №29. P. 769-774.
5. Shen Y., Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. № 21. P. 371-392.
6. Uisung L., Elango B., Chung J. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications // *Applied Energy*. 2013. №101. P. 699-708.
7. Liu X. Calcium Methoxide as a Solid Base Catalyst for the Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel with Methanol // *Fuel*. 2008. V. 87. P. 1076–1082.
8. Russbueltdt B., Hoelderich W. New Rare Earth Oxide Catalysts for the Transesterification of Triglycerides with Methanol Resulting in Biodiesel and Pure Glycerol // *Journal of Catalysis*. 2010. V. 271 (2). P. 290–304.
9. Demirbas A. Biodiesel: a Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines // London : Springer-Verlag London Limited, 2018. 209 p.
10. Balat M. Significance of LPG in Turkish Vehicular Transportation // *Energy Sources*. 2005. N. 27. P. 485-488.
11. Syred N. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners // *Applied Energy*. 2015. № 89 (1). P. 106-110.
12. Lieuwen T. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability. // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2008. №130 (1). 10p.
13. Arutyunov V. Utilization of Associated Petroleum Gas via Small-Scale Power Generation // *Russian journal of general chemistry*. 2011. V. 81. N. 12.
14. Faramawy S. Natural gas origin, composition, and processing // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. № 34. P. 34-54.
15. Ahrenfeldt J., Thomsen T., Henriksen U., Clausen L. Biomass gasification cogeneration. - A review of state of the art technology and near future perspectives // *Applied Thermal Engineering*. 2015. №50. P. 1407-1417.
16. Тюрина Э.А., Медников А.С., Елсуков П.Ю. Модульные установки комбинированного производства электроэнергии и жидких топлив на основе древесной биомассы. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22(1). С. 113-127.
17. Таймаров М.А., Ильин В.К., Осипов А.Л., Долгова А.Н., Ахмеров А.В. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2019. Т. 21(3-4). С. 7-14.
18. Таймаров М.А., Кувшинов Н.Е., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г. Особенности химических реакций горения метано-водородной фракции в радиантных топках. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2016. Т. 21(11-12). С. 124-128.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р тех. наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Чикляев Евгений Геннадьевич – старший преподаватель, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Taimarov MA, Chiklyayev EG, Kasimova LI. Obtaining hydrogen from secondary wood. In the collection of articles of the *International scientific and practical conference Science in modern society: patterns and trends of development*. Aeterna, Magnitogorsk, 2018. p. 44 -47.
2. Taimarov MA, Chiklyayev EG, Kasimova LI. Pyrogenetic processing of wood with variable process parameters. In the collection of articles of the *International scientific and practical conference: Technological cooperation of science and production: new ideas and prospects for development*. Aeterna, Tyumen, 2018, pp. 64-67.
3. Beckmann M, Klepmann F, Martin J, Scholz R. *Classification of Waste-to-energy Plants in Terms of Energy Recovery*. VGB PowerTech. 2017;10:76-81.
4. Francois J, Abdelouahed L, Mauviel G, et al. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus. *Chemical engineering transactions*. 2016;29:769-774.
5. Shen Y, Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;21:371–392.
6. Uisung L., Elango B., Chung J. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications. *Applied Energy*. 2013;101:699-708.

7. Liu X. Calcium Methoxide as a Solid Base Catalyst for the Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel with Methanol. *Fuel*. 2008;87:1076–1082.
8. Russbueldt B, Hoelderich W. New Rare Earth Oxide Catalysts for the Transesterification of Triglycerides with Methanol Resulting in Biodiesel and Pure Glycerol. *Journal of Catalysis*. 2010;271(2): 290–304.
9. Demirbas A. *Biodiesel: a Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. London : Springer-Verlag London Limited, 2018. 209 p.
10. Balat M. Significance of LPG in Turkish Vehicular Transportation. *Energy Sources*. 2005;27:485-488.
11. Syred N. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners. *Applied Energy*. 2015;89 (1):106-110.
12. Lieuwen T. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2008;130(1):10.
13. Arutyunov V. Utilization of Associated Petroleum Gas via Small-Scale Power Generation Russian journal of general chemistry. 2011;81:12.
14. Faramawy S. Natural gas origin, composition, and processing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34:34-54.
15. Ahrenfeldt J, Thomsen T, Henriksen U, et al. Biomass gasification cogeneration. - A review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering*. 2015;50:1407-1417.
16. Tyurina EA, Mednikov AS, Elsukov PYu. Modular plants for combined biomass-based production of electricity and synthetic liquid fuel. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):113-127.
17. Taimarov MA, Ilyin VK, Osipov AL, et al. Heat pumps complex for recycling of secondary energy resources of petrochemical plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21 (3-4):7-14.
18. Tajmarov MA, Kuvshinov NE, Ahmetova RV, et al. Especially the chemical reactions of combustion of methane-hydrogen fraction in radiant furnaces. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(11-12):124-128.

Authors of the publication

Mikhail A. Taimarov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgenii G. Chiklyayev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

19 ноября 2020г.

Отредактировано

10 декабря 2020г.

Принято

10 декабря 2020г.



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТАТАРСТАНЕ

А.А. Филимонова, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, А.Г. Филимонов,
А.В. Печенкин

Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Россия
aachichirova@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы и пути развития водородной энергетики в России и в Республике Татарстан. Проанализировать основные возможности для производства, транспортировки, использования водорода на предприятиях Татарстана. Провести расчет экономической эффективности производства «зеленого» водорода электролизом на ТЭС с ПГУ в Татарстане. МЕТОДЫ. Основаны на анализе литературных данных и проведении математических расчетов. РЕЗУЛЬТАТЫ. «Зеленый» водород является многообещающим решением для декарбонизированной энергетической системы, и 2020 год ознаменовался «взрывным» вниманием к его использованию во всем мире. Татарстан, как один из ведущих экономически развитых регионов России мог бы принять участие в производстве «зеленого» водорода, конструировании электрохимического оборудования для его получения, разработке технологий использования топливных элементов, научных исследованиях и подготовке высококвалифицированных специалистов в области водородной энергетики. По проведенным расчетам производство наиболее экологически чистого водорода на ТЭС с ПГУ в Татарстане в настоящее время обойдется в среднем 2 евро за килограмм, что значительно ниже существующей рыночной стоимости. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Татарстан может стать конкурентоспособным регионом по производству и дистрибуции «зеленого» водорода. Основными направлениями деятельности должны быть получение чистого водорода, промышленное производство грузового транспорта на топливных элементах, производство электролизеров мегаваттного класса, утилизация водородсодержащих нефтяных газов на ТЭС в газовых турбинах или комбинированных циклах с топливными элементами.

Ключевые слова: водородная энергетика, «зеленый» водород, производство, очистка, хранение, транспортировка, использование водорода.

Для цитирования: Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Печенкин А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 79-91. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN POWER ENGINEERING IN TATARSTAN

AA. Filimonova, AA. Chichirov, ND. Chichirova, AG. Filimonov, AV. Pechenkin

Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russia
aachichirova@mail.ru

Abstract: PURPOSE. Consider the problems and ways of developing hydrogen energy in Russia and in the Republic of Tatarstan. Analyze the main opportunities for the production, transportation, use of hydrogen at the enterprises of Tatarstan. Calculate the economic efficiency of the production of "green" hydrogen by electrolysis at TPP with CCGT in Tatarstan. METHODS. Based on the analysis of literature data and mathematical calculations. RESULTS. Green hydrogen is a promising solution for a decarbonized energy system, and 2020 saw an explosive focus on its use around the world. Tatarstan, as one of the leading economically developed regions of Russia, could take part in the production of "green" hydrogen, the design of

electrochemical equipment for its production, the development of technologies for the use of fuel cells, scientific research and training of highly qualified specialists in the field of hydrogen energy. According to the calculations, the production of the most environmentally friendly hydrogen at TPPs with CCGT in Tatarstan will currently cost an average of 2 euros per kilogram, which is significantly lower than the existing market value. CONCLUSION. Tatarstan can become a competitive region for the production and distribution of "green" hydrogen. The main areas of activity should be the production of pure hydrogen, the industrial production of freight transport on fuel cells, the production of megawatt-class electrolyzers, the utilization of hydrogen-containing petroleum gases at TPPs in gas turbines or combined cycles with fuel cells.

Key words: hydrogen energy, «green» hydrogen, production, purification, storage, transportation, use of hydrogen.

For citation: Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, Filimonov AG, Pechenkin AV. Prospects for the development of hydrogen power engineering in Tatarstan. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):79-91. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-79-91.

Введение

В 2020 году в повестке международной энергетической стратегии развития появилась тема перехода на водородную энергетику с громкими дебатами во всех экономически развитых странах и разработкой программ планирования научных исследований и замены органического топлива на экологически чистый водород. Первичным импульсом к появлению такой идеи явилась концепция энергетической безопасности Европейского союза, стремящегося любыми средствами избавиться от углеродной зависимости. Это ведет к резкому ускорению водородных проектов, чаще всего пока экономически необоснованных. Интересно то, что еще в 2019 году водородная экономика являлась научным проектом. Несмотря на экономические последствия распространения Covid-19, когда многие правительства испытывают финансовые затруднения, реализация долгосрочных безуглеродных программ, обосновываемая целями устойчивого развития, продолжается и даже становится приоритетной. Это происходит как на национальном, так и на общемировом уровне. Часто пропагандируемое средство для выхода из рецессии - начать производство водорода. В современных условиях международного социально-экономического кризиса именно с водородной экономикой связывают устойчивое развитие энергетики и промышленности, подразумевая это топливо абсолютной реальностью, которая будет развернута в течение 5-10 лет [1, 2, 3].

Несмотря на то, что для России данное направление ведет к вполне понятным бюджетным рискам, связанным со снижением сырьевых доходов, игнорирование общемировых тенденций развития, может привести к разрушению устоявшихся структурных экономических ресурсных связей. Глобальная водородная заявка является вызовом для развития российской экономики, с которым предстоит выйти на новый уровень научных разработок и установить наиболее выигрышные для нашей страны с экономической и политической точки зрения условия использования водородного топлива. Если будущее человечества связано с эрой водорода, то неизбежно возникнет ситуация, в которой будут стороны, у которых есть ресурсы для создания «зеленого» водорода, и те, у кого их нет. Такое разделение может привести к геополитическому конфликту, похожему на настоящее деление регионов по владению запасами природного газа и нефти. И даже в пределах нашей страны может произойти разделение на богатые и бедные области, обладающие технологиями получения и использования водорода и не владеющие ими.

Водород считается основным строительным блоком в фундаменте экологически безопасного энергоснабжения будущего. Однако, для России, учитывая ее географические, геополитические, внутриэкономические и другие особенности, политика в области водорода будет отличаться от политики стран Европейского союза, США и других экономических держав. Эксперты полагают, что Германия и другие страны Европы будут полагаться на крупный импорт, поскольку у них недостаточно места для производства водорода с помощью возобновляемых источников энергии. Учитывая, что Россия на настоящий момент главный поставщик энергоресурсов в Европейский союз и обладает действующей инфраструктурой и исходной сырьевой базой, сохранение такого важнейшего экспортного рынка для России является первостепенной задачей. Учитывая текущую геополитическую ситуацию, обостренную зависимостью Евросоюза от российского газа, эти торговые связи одновременно являются и стабилизирующим фактором в

проблематичных отношениях западных государств с Россией. В этой связи крайне желательно нашей стране сохранить за собой эти позиции и в случае перехода на водородное топливо. Таким образом, первоочередным направлением в области водородной экономики (политики) для нашей страны и ее ведущих регионов, таких как Татарстан, является получение высокочистого водорода и транспортировка его в другие страны, а также освоение производств на его основе на территории нашей страны.

В ходе планируемой декарбонизации европейской энергетики сжигание природного газа в ближайшие десятилетия должно значительно сократиться. Согласно исследованию, проведенному Федеральным ведомством по охране окружающей среды Германии, при планируемом сокращении выбросов парниковых газов на 95 % спрос на природный газ к 2050 году сократится до 10 % от сегодняшних значений. А чтобы достичь цели ЕС по нейтрализации парниковых выбросов, сжигание природного газа до 2050 года должно быть полностью прекращено [2, 3]. Имея большой потенциал для производства энергии из возобновляемых источников, Россия могла бы стать одним из важных поставщиков так называемого «зеленого» водорода. Благодаря географической близости к Западной Европе и уже имеющимся газопроводам Россия обладает важным преимуществом по отношению к другим потенциальным странам-поставщикам в том, что касается стоимости поставок. На транспортировку водорода приходится значительная доля расходов при получении этого энергоносителя. Его поставка через систему трубопроводов намного дешевле, чем альтернативные варианты, такие как, например, перевозка по морю сжиженного водорода.

В России на сегодняшний день водород входит в тройку наиболее востребованных промышленностью газов, уступая лишь кислороду и азоту (рис. 1). По некоторым оценкам[4], к 2025 году рост производства будет более или менее постоянным при нынешних темпах и составит 3,5%.

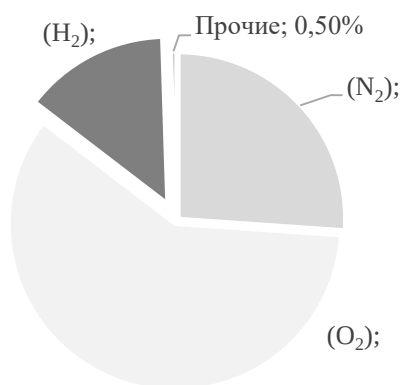


Рис. 1. Структура производства промышленных газов в России (2018 г.), %

Однако, в отличие от других промышленных газов водород в России практически не является товарным продуктом - чаще всего он вырабатывается и используется на одном и том же предприятии. Таким образом, нашей стране еще только предстоит переформатировать имеющееся производство на экспортный рынок и дополнить его технологиями получения и транспортировки «зеленого» водорода в масштабах.

Материалы и методы

Материалы и методы включают обзор литературных и имеющихся статистических данных с целью проведения анализа текущей ситуации и прогноза потенциальных возможностей для Татарстана по получению, хранению, использованию и дистрибуции водородного топлива.

С целью проведения экономической оценки инвестиционной привлекательности внедрения на ПГУ системы использования электроэнергии собственного производства для выработки «зеленого» водорода проведены математические расчеты экономической целесообразности производства «зеленого» водорода на ТЭС с ПГУ в Татарстане в текущих рыночных условиях.

Перспективные направления для Татарстана

Крупнейшие производители грузовых автомобилей в Евросоюзе 14 декабря 2020 года решили прекратить продажи большегрузных машин с бензиновыми и дизельными двигателями к 2040 году - на десятилетие раньше, чем первоначально планировалось. *CNH, Daimler, DAF, Ford, MAN, Scania* и *Volvo* подписали совместное заявление с Потсдамским институтом климатических исследований, согласно которому к 2040 году они взяли на себя обязательство отказаться от ископаемого топлива. Амбициозное заявление производителей

грузовиков соответствует тому, что Европейская комиссия изложила в своей новой стратегии устойчивой мобильности, которая направлена на то, чтобы к 2030 году использовать на дорогах 80 000 грузовиков с нулевым уровнем выбросов, а к 2050 году все новые продажи должны быть экологически чистыми. «Надежные и эффективные автомобили с нулевым уровнем выбросов уже начинают появляться на рынке, но нам нужно будет быстро увеличить их количество и диапазон в течение следующих нескольких лет», - говорится в заявлении. Новые правила ЕС, в том числе о дорожных сборах и предстоящий пересмотр законодательства блока о налогообложении энергии, вероятно, сместят иглу с ископаемого топлива в сторону электромобилей, водорода и низкоуглеродного топлива [3].

Тем временем крупнейший производитель тяжелых грузовых автомобилей, входящий в двадцатку ведущих мировых производителей, татарстанское предприятие ПАО «КАМАЗ» разрабатывает проект создания водородного автомобиля на 18 тонн и водородного автобуса на топливных элементах. Топливные элементы планируется устанавливать отечественного производства, разработанные компанией «ИнЭнерджи» совместно с Институтом проблем химической физики г. Черноголовка. В связи с таким проектом уже сейчас в Татарстане возник спрос на собственное производство водорода высокой степени чистоты для топливных элементов.

Татарстан является лидирующим экономически развитым регионом. Республика расположена в центре крупного индустриального района Российской Федерации, на пересечении важнейших магистралей, соединяющих восток и запад, север и юг страны. Республика Татарстан обладает значительным экономическим потенциалом и перспективным человеческим капиталом. Конкурентными преимуществами Татарстана являются выгодное географическое положение, богатые природные ресурсы, высококвалифицированные трудовые ресурсы, мощный промышленный и научный комплекс, развитая транспортная инфраструктура.

В структуре валового регионального продукта Татарстана доля промышленности составляет 48,1%, сельского хозяйства – 5,6%, строительства – 8,1%, транспортировки и хранения – 4,8%. Промышленный профиль Республики Татарстан определяют нефтегазохимический комплекс, крупные машиностроительные предприятия, производящие конкурентоспособную продукцию, а также развитое электро- и радиоприборостроение. Татарстан – это регион высокоинтенсивного сельскохозяйственного производства. Занимая 2,2% сельхозугодий России, республика производит 4,2% ее валовой сельхозпродукции.

В Республике Татарстан огромное внимание уделяется внедрению новых перспективных технологий. Эффективно функционируют площадки создания и развития инновационных проектов на базе технологических и ИТ парков, зон с льготным налогообложением, различных центров развития, в том числе повышения энергетической эффективности. Татарстан имеет не просто огромный научно-производственный потенциал по созданию технологий получения, использования и дистрибуции водородного топлива в другие регионы и страны, но и помимо научной базы - производственную структуру, готовую к внедрению новых технологий и выводу ее на качественно значимый уровень экономического функционирования.

В Татарстане имеются первичные возможности по производству «зеленого» водорода и любого другого цвета, кроме использования энергии атомных станций [5]. На всех традиционных электростанциях Татарстана производится электролиз воды с получением высокочистого экологичного водорода для систем охлаждения электротурбогенераторов. Эта технология отработана десятилетиями и понятна энергетикам. На нефтеперерабатывающих заводах предприятия ПАО «Нижнекамскнефтехим» на установках каталитического риформинга нефти (CNR) производится побочный водород, который затем используется при десульфуризации топлива. Этот водород может использоваться в высокотемпературных топливных элементах, а, также, для прямого сжигания в газовых турбинах. К 2024 году на Нижнекамской ТЭЦ-1 планируется строительство ГТУ, сжигающей в качестве топлива углеводородно-водородную смесь, являющуюся отходом нефтехимических производств. Понятно, что говорить о факте экономически значимого освоения водородных технологий в Татарстане пока рано, но видимый вектор развития означает верное направление принятого технологического рывка. Безусловно, требуется серьезная научная доработка технологий внедрения водорода в производственные циклы предприятий, тяжелая дорога по прототипированию новых промышленных установок и созданию первых предсерийных

образцов, но нашей стране, выигравшей в свое время общемировую космическую гонку, решение задач подобного уровня по силам.

«Зеленый» водород рассматривается как ключевой вектор декарбонизации широкого энергетического сектора, поскольку его можно использовать для транспорта с нулевым выбросом углерода, отопления, тяжелой промышленности, долгосрочного хранения энергии и в качестве основы углеродно-нейтрального синтетического топлива. Но «зеленый» H_2 на 50–300% дороже, чем «серый водород», получаемый из природного газа. Отчасти это связано с тем, что электролизеры еще не получили промышленного развития и по-прежнему производятся в основном вручную в относительно небольших количествах. Следовательно, этот сектор необходимо быстро наращивать, и ожидается, что эффект масштабирования приведет к снижению затрат на электролизеры и экологически чистый водород в этом десятилетии станет экономически доступнее, примерно, на 50%. Одним из направлений развития водородной экономики Татарстана могло бы стать промышленное производство электролизеров мегаваттного класса, тем более, что в Татарстане развито машиностроение, электро-приборостроение и имеется сильная научно-технологическая база.

Чтобы это сработало, необходимо сделать инвестиции в такие области, как процесс электролиза, с настоящего момента до 2030 года. По приблизительным расчетам для стран ЕС это может составить от 24 до 42 миллиардов евро. Другая область - транспортировка, распределение и хранение водорода, здесь потребуются инвестиции в размере 65 миллиардов евро [2, 3]. Для Татарстана такие расчеты не проводились, можно лишь предполагать, что финансовые вложения со стороны государства должны быть эквивалентные.

В новом отчете IRENA «*Green hydrogen cost reduction*» указывается, что снижение стоимости возобновляемой энергии и совершенствование технологий электролизеров могут сделать «зеленый» водород конкурентоспособным к 2030 году [6]. «Зеленый» водород в настоящее время стоит в два-три раза больше, чем «синий» водород, который производится с использованием ископаемого топлива в сочетании с улавливанием и хранением углерода. IRENA излагает стратегии снижения затрат на электролизеры за счет непрерывных инноваций, повышения производительности и масштабирования с МВт до гигаваттного (ГВт) уровней, которые в совокупности приводят к падению стоимости электролизеров на 40% в краткосрочной перспективе и до 80% в долгосрочной перспективе. Высокоэффективные электролизеры дороги и в их конструкции применяются редкоземельные материалы (платина и иридий), на эти материалы приходится почти 50% стоимости электролизеров, поэтому при увеличении производительности по выходу водорода, т.е. масштабировании, удельная стоимость аппаратов снижается.

Комбинированное снижение затрат на электроэнергию и электролизеры с повышенным КПД и сроком службы может обеспечить снижение стоимости H_2 на 80% (рис. 2).

Экономику работы *power-to-gas (P2G)*, основанной на производстве водорода электролизом, можно значительно улучшить, если включить ее в систему вспомогательных услуг электросети [8]. Вспомогательные услуги являются частью электроэнергетической системы и используются для уравнивания временных отклонений между производством и потреблением электроэнергии и, таким образом, обеспечивают безопасную и бесперебойную работу электроэнергетической системы [9]. Следует учитывать, что работа устойчивых источников энергии (гидро-, фотоэлектрических и ветровых) сильно зависит от погоды и, следовательно, не может соответствовать реальным потребностям в энергии. Эта проблема становится более серьезной с вводом многих новых устойчивых источников энергии. Подсчитано, что на каждые 100 МВт вновь установленных устойчивых источников энергии необходимо 4–10 МВт вспомогательных услуг для поддержания сбалансированности сети. Как правило, системы, включенные в вспомогательные услуги, обеспечивают дополнительную электроэнергию при ее недостатке и обеспечивают дополнительное потребление или накопление энергии, когда в системе имеется избыток электроэнергии.

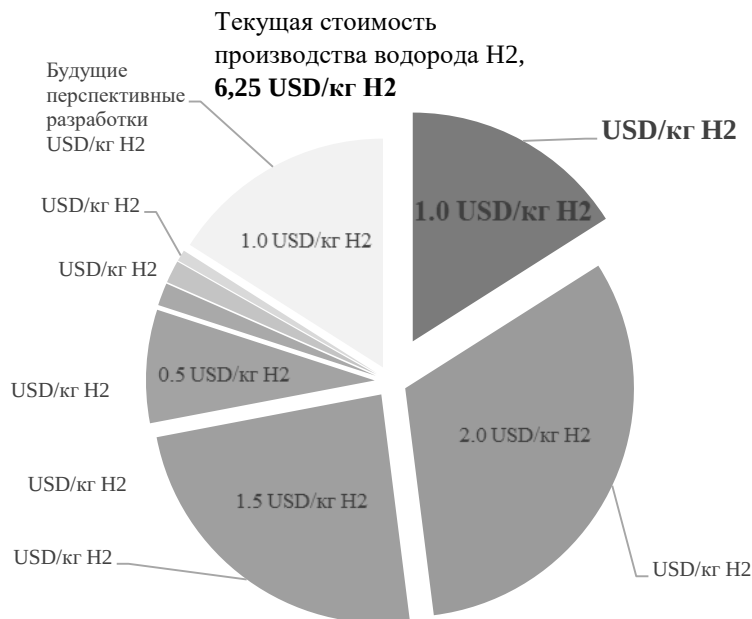


Рис. 2. Прогноз стоимости производства водорода с учетом развития технологий производства электролизеров, повышения их эффективности и срока службы

Основные направления снижения стоимости электролизеров следующие:

- Конструкция электролизера. Увеличенный размер модуля и инновации, связанные с увеличением производства стеков, существенно влияют на стоимость. Увеличение мощности электролизера с 1 МВт (типичная для 2020 г.) до 20 МВт может снизить затраты более чем на 30%. Оптимальная конструкция системы обеспечивает максимальную эффективность и гибкость.

- Экономия на масштабе. Увеличение объемов производства стеков с помощью автоматизированных процессов на производственных мощностях гигаваттного масштаба может привести к постепенному снижению затрат. Нехватка базовых материалов может препятствовать снижению стоимости электролизера и расширению масштабов производства.

- Эффективность и гибкость в работе. При использовании ВИЭ в качестве источника питания возможны большие потери эффективности при низкой нагрузке электролизера, что ограничивает гибкость системы с экономической точки зрения.

- Промышленное применение. Конструкция и работа систем электролиза могут быть оптимизированы для конкретных применений в различных отраслях промышленности.

- Темпы обучения. Исходя из исторического снижения стоимости солнечной фотоэлектрической энергии, темпы освоения производства для топливных элементов и электролизеров увеличиваются, в результате чего затраты снижаются и могут достичь значений от 16% до 21%.

- Амбициозное смягчение последствий изменения климата. Амбициозный энергетический переход, согласованный с ключевыми международными климатическими целями, приведет к быстрому снижению затрат на экологически чистый водород. Траектория, необходимая для ограничения глобального потепления на уровне 1,5° C, может сделать электролизеры примерно на 40% дешевле к 2030 году.

Несмотря на то, что человечество хочет иметь «зеленый» водород, для достижения этого этапа может потребоваться переходная фаза «голубого», «коричневого» и «серого» водорода в краткосрочной перспективе для ускорения спроса и предложения использования водорода. Тем более что нефте-газовые компании в этом крайне заинтересованы. Так как получение «зеленого» водорода исключает их из списка игроков, а получение «серого» и «голубого» делает основными игроками рынка [7]. Татарстан в этом плане имеет возможность предложить все виды водорода для осуществления плавного перехода от «серого» к «зеленому».

Поскольку мировая экономика стремится стать углеродно-нейтральной, конкурентоспособный водород, производимый с использованием ВИЭ, стал ключевым компонентом энергобаланса.

По данным Минэнерго России согласно государственной программе поддержки ВИЭ к 2024 году в эксплуатацию в России должно быть введено 3,4 ГВт ветроэлектростанций, 2,2 ГВт солнечных электростанций и 210 МВт мини-ГЭС. Татарстан мог бы работать в тандеме с объектами ВИЭ, активно развиваемыми в соседних регионах. Например, ВЭС в Ульяновской области компании *Fortum*, объектами СЭС в Башкортостане и другими.

Еще одним вектором развития водородной энергетики в Татарстане может стать распределенная энергетика. Это особенно важно, учитывая высокую территориальную распределенность потребителей нефтедобывающего комплекса республики, объектов сельскохозяйственного назначения. Идея состоит в создании небольших распределенных электростанций на твердооксидных топливных элементах, которые можно использовать в городах, в промышленности, в торговле и коммерции, центрах обработки данных и инфраструктуре зарядки электромобилей. С учетом способности высокотемпературных топливных элементов работать на «грязном» водороде, в этом случае можно использовать образующуюся при нефтепереработке водородсодержащую смесь газов.

Экономическая оценка инвестиционной привлекательности внедрения на ПГУ системы использования электроэнергии собственного производства для выработки «зеленого» водорода

Производство и потребление водорода в Татарстане в основном (более 90%) связано с промышленным использованием. Основными промышленными потребителями являются химическая промышленность (63%), нефтеперерабатывающие заводы (30%), металлообработка (6%) и энергетика (1%).

В мире, в настоящее время, производство водорода возглавляют некоторые крупные промышленные производители, которые играют ключевую роль в определении цен на внутреннем рынке. Рыночная цена обычно зависит от требуемых параметров (например, чистоты). Кроме того, цена на водород зависит от местонахождения покупателя, с этим связан способ доставки водорода (сжиженный или газообразный). Транспортировка, распределение и хранение водорода особенно важны, когда водород производится в больших масштабах на специализированных централизованных производственных предприятиях и доставляется удаленным пользователям. В настоящее время в промышленности наиболее широко используемым методом производства водорода является паровой риформинг метана на месте. Поскольку эта технология является зрелой и текущая цена на природный газ невысока и колеблется от 2 до 3 евро/кг [10], в зависимости от размера установки парового риформинга. Технология парового риформинга генерирует выбросы CO₂, поэтому производимый водород не является экологически чистым. С другой стороны, известно, что в настоящее время отпускные цены на водород могут варьироваться от 10 до 60 евро/кг [4], где 60 евро/кг - это цена водорода с особенно высокой степенью чистоты, используемого для полупроводников и специальных применений. Имея это в виду, более надежным подходом к прогнозированию цены на водород является анализ затрат на его производство.

Для транспортного сектора прогнозируемая рыночная стоимость водорода к 2025 гг. по оценкам *FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking)* государственно-частного партнерства промышленности и Европейской комиссии по топливным элементам и водороду с учетом различных уровней проникновения на рынок технологий производства водорода снизится с 10-20 евро до 4,5-7 за килограмм [4].

Сейчас построение систем поддержки «зеленой» энергетики в мире и в странах Европейского союза во многом ограничено технологиями малой возобновляемой энергетики, такими как мини-ГЭС и солнечная энергетика. Вместе с тем, учитывая ступенчатость (этапность) технологического развития, достижения текущей научной парадигмы говорят о целесообразности сегментированного подхода к оценке возможных воздействий на производственные отношения для снижения негативного воздействия на окружающую среду и создания ритмичного комплексного общемирового технологически и экономически связанного саморегулируемого организма, обеспечивающего свое устойчивое развитие на всех этапах жизнедеятельности нашего общества. В качестве примера можно привести позицию некоторых экспертов о косвенном влиянии на экологию объектов ВИЭ, связанную с их производством и утилизацией, оказывающих еще большее негативное влияние на биосферу, нежели применение традиционной энергетики.

На наш взгляд, исходя из критерия оптимизационного поиска функции по наименьшему воздействию на окружающую среду, удовлетворяет применение комплекса технологий, которые помимо объектов ВИЭ, обоснованных с точки зрения технологий распределенной интеллектуально управляемой генерации, включают применения базовых узловых источников энергии, осуществляющих производство энергии на наилучших

доступных технологиях (в настоящее время это парогазовые технологии) с контролируемым в масштабах мирового сообщества воздействием на ноосферу через механизмы «зеленых» сертификатов, что в целом обеспечивает устойчивое самовосстанавливаемое равновесие углеродных жизнеобеспечивающих экосистем мирового масштаба.

На оптовом рынке России цены на электроэнергию в последнее десятилетие колеблются в среднем около 17-20 евро / МВт-ч, где цена производства примерно на 30% ниже. При этом стоимость производства электроэнергии на ТЭС с ПГУ примерно в 1,5 раза ниже чем на традиционных ТЭС. Применение новых парогазовых технологий при использовании природного газа в качестве исходного топлива является общепризнанной мировой технологий, не имеющей экономически обоснованной альтернативы. В Республике Татарстан представлен широкий спектр ПГУ с газотурбинными установками E, F и H класса, т.е. фактически вся мировая линейка технологий вплоть до самого совершенного H класса с КПД до 65%. На Казанской ТЭЦ-1 и Казанской ТЭЦ-2 установлены (в 2018 и 2014 годах, соответственно) по 2 блока ПГУ с газовыми турбинами F-класса типа *GEPC6111FA* (MS6001F/FA) мощностью 77 МВт каждая. На Казанской ТЭЦ-3 с 2017 года эксплуатируется единственная в России ГТУН-класса *GE 9HA.01* мощностью 405,6 МВт [11,12].

ПАО «Нижнекамскнефтехим» запускает в эксплуатацию с 2021 года ПГУ-500 МВт для собственных нужд компании с газовыми турбинами *Siemens E*-класса с использованием в качестве топлива отдувок нефтехимических производств, включая продукты переработки нефтяного газа с действующего производства этилена. На Заинской ГРЭС в 2025 году запланирован ввод в эксплуатацию энергоблока ПГУ мощностью 858,3 МВт с газотурбинной установкой *GE 9HA.02*.

Для повышения операционной рентабельности проведена оценка возможности внедрения системы P2G на ТЭС с ПГУ для производства зеленого водорода с целью повышения эффективности работы и последующего достижения финансовых эффектов.

Первичным этапом преобразования электроэнергии в водород является строительство системы преобразования энергии в газ на ТЭС с ПГУ.

Технология P2G за последние годы значительно продвинулась вперед. Обзор последних статей в области разработки и использования систем P2G [13-16] показывает, что эта система обеспечивает возможность хранения возобновляемой энергии, поддерживает переход к устойчивым энергетическим системам, может быть важным источником возобновляемых газов (таких как водород, кислород, синтетический природный газ), а также может играть важную роль в рыночных ценах на электроэнергию. В ожидании появления на рынке электроэнергии высокой доли возобновляемых источников энергии технология P2G переходит от инноваций к коммерциализации [17], и уже существует ряд поставщиков систем P2G. Тремя основными блоками, составляющими установку P2G, являются: электролизер, система буферных резервуаров для водорода/кислорода вместе с компонентами отделения фракции воды и окончательное хранение перед распределением водорода конечным потребителям или дальнейшими процессами (рис. 3).

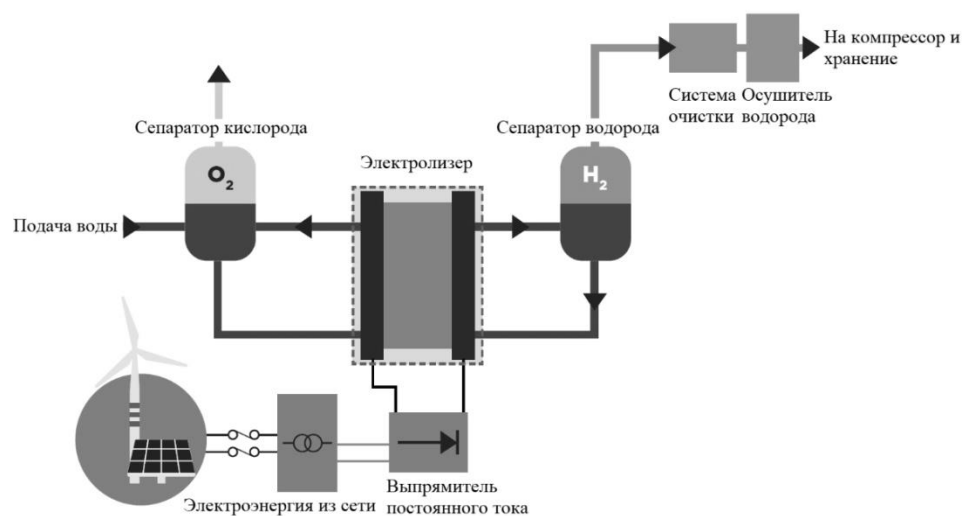


Рис. 3. Принципиальная схема получения водорода на технологии P2G

В России компании предлагают промышленные электролизеры с производительностью по водороду, достигающей 500 нм³/час при удельном расходе электроэнергии 5,2 кВт·ч/нм³ [18]. Крупнейшим в мире работающим электролизером будет установка мощностью 10 МВт в Японии. Следовательно, этот сектор необходимо быстро наращивать, и ожидается, что эффект масштабирования приведет к снижению затрат на электролизеры и экологически чистый водород в этом десятилетии примерно на 50%. В странах ЕС разрабатываются модели электролизеров с номинальной мощностью до 30 МВт. Компания *Hydro-Québec* в Канаде приступила к разработке электролизера мощностью 90 МВт [2, 3].

Расчет экономической целесообразности производства «зеленого» водорода на ТЭС с ПГУ в Татарстане в текущих рыночных условиях

Для расчета затрат на производство зеленого водорода для ТЭС с ПГУ используются технические характеристики одной из типовых коммерчески доступных систем P2G (табл. 1) [19].

Таблица 1

Техническая спецификация электролизной установки

Технические параметры	Значение
Номинальная мощность	1 МВт
Производительность по водороду	300 нм ³ /час
Регулирование производительности по водороду	15-100%
Удельный расход электроэнергии	4,4 кВт·ч/нм ³
Давление водорода на выходе	30-200 кгс/см ²

Для различных расчетов используются следующие данные о водороде:

- удельная плотность - 0,08988 кг/нм³;
- нижняя теплотворная способность (НТС) - 119,96 МДж/кг (т. е. 33,32 кВт·ч/кг или 3,00 кВт·ч/нм³).

Используя эти данные и технические характеристики системы P2G, можно рассчитать максимальное суточное производство водорода ($0,08988 \text{ кг/нм}^3 \cdot 300 \text{ нм}^3/\text{час} = 27 \text{ кг/ч}$ или 647 кг/сут) и определить потребление электроэнергии при максимальной производительности ($4,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/нм}^3 \cdot 300 \text{ нм}^3/\text{час} / 27 \text{ кг/ч} = 48,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$).

Из данных (табл. 1) мы можем определить КПД системы P2G, то есть соотношение между внутренней энергией производимого водорода и энергией, вложенной в производство водорода:

$$\eta (\text{P2G}) = \text{энергия водорода (кВт} \cdot \text{ч/кг)} / \text{энергия производства водорода (кВт} \cdot \text{ч/кг)}.$$

С учетом НТС генерируемого водорода и максимального потребления электролизера (48,9 кВт·ч/кг) эффективность системы P2G составляет:

$$\eta (\text{P2G}) = 33,32 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг} / 48,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг} = 0,681 = 68,1\%.$$

Максимальное потребление электроэнергии системой P2G, необходимое для полной мощности производства водорода (300 нм³/ч), составляет:

$$P = 300 \text{ нм}^3/\text{ч} \times 4,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{нм}^3 = 1320 \text{ кВт} = 1,32 \text{ МВт}.$$

Стоимость настройки системы P2G сегодня все еще относительно высока. Основываясь на предложениях некоторых коммерческих поставщиков системы P2G и литературных данных, основные расчетные затраты на внедрение системы P2G мощностью около 1 МВт перечислены в табл. 2. Соотношение евро к рублю принято за 1/90.

Таблица 2

Расчет стоимости строительства генерирующей водород установки на ТЭС с ПГУ

Стоимость строительства электролизной установки	Ориентировочная стоимость
Проектная документация	100 000 €
Стоимость установки	1 500 000 €
Монтажные работы	600 000 €
Общая стоимость	2200 000 €

Таким образом можно оценить капитальные и эксплуатационные затраты на установку и эксплуатацию системы P2G (табл. 2). Их соответствующие значения - это капитальные затраты в размере 2 200 000 евро и операционные затраты 110 000 евро в год, где операционные затраты рассчитываются как 5% от капитальных затрат.

Экономическая целесообразность производства водорода на ТЭС с ПГУ.

Стоимость производства водорода состоит из двух частей:

PЗ - затраты, связанные с капитальными (К) и оперативными (О) затратами на оборудование и обслуживание системы P2G.

ЭЗ - стоимость электроэнергии для работы системы P2G и производства водорода.

С учетом технических характеристик системы P2G (табл. 1) PЗ рассчитывается как:

$$PЗ = (K + O) / \text{общее количество } H_2 = (2\,200\,000 \text{ евро} + 20 \text{ лет} \times 110\,000 \text{ евро}) / 3\,778\,480 \text{ кг} = 1,16 \text{ €/кг},$$

где общее производство водорода за 20 лет рассчитано в предположении, что система работает 80% времени, а общее количество произведенного H_2 :

$$647 \text{ кг/сут} \times 365 \text{ дней/год} \times 20 \text{ лет} \times 0,8 = 3\,778\,480 \text{ кг}.$$

ЭЗ рассчитывается как:

$$ЭЗ (\text{€/кг}) = \text{цена на электроэнергию} (\text{€/кВт}\cdot\text{ч}) \times \text{потребление энергии для производства водорода} (\text{кВт}\cdot\text{ч/кг}).$$

Результаты расчетов собраны в таблице 3, в которой показана структура цены на производство водорода при различных затратах на электроэнергию и предполагаемом потреблении электролизера (вместо заявленных 48,9 кВт·ч/кг мы использовали округленное значение 50 кВт·ч/кг).

Таблица 3

Стоимость производства водорода в зависимости от цены на электроэнергию. PC1 относится к системному оборудованию P2G и затратам на обслуживание, PC2 - к стоимости электроэнергии для работы системы P2G, а PC (итого) - к общей стоимости производства.

Цена на электроэнергию	PЗ	ЭЗ	Общее
17 €/МВт	1,16 €/кг	0,85 €/кг	2 €/кг
20 €/МВт	1,16 €/кг	1 €/кг	2,16 €/кг

Производственные затраты, описанные в табл. 3, не включают налог на добавленную стоимость (НДС) и другие сборы, взимаемые с транспортного топлива. Среднее энергопотребление системы P2G в приведенном выше случае составляет:

$$27 \text{ кг/ч} \times 0,8 \times 50 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг } H_2 = 1,08 \text{ МВт}.$$

Общее годовое потребление электроэнергии в системе P2G составляет 9460,8 МВт·ч.

Расчет затрат/прибыли для ТЭС при производстве водорода вместо электроэнергии

В этом подразделе анализируется, по какой цене производство и продажа водорода становится более выгодной, чем продажа электроэнергии. В случае, если отпускная цена водорода равна производственной цене (2,16 евро/кг), затраты на систему P2G (капитальные и операционные затраты) и затраты на электроэнергию покрываются, но дополнительной прибыли нет. Экономический эффект для ТЭС с ПГУ такой же, как если бы она продавала свою электроэнергию на коммерческом рынке по цене 20 евро/МВт·ч.

В случае достижения отпускной цены на водород выше 2,16 евро/кг производство и продажа водорода становится более выгодным, чем продажа электроэнергии. В табл. 4 показана прибыль от продажи водорода по разным отпускным ценам.

Таблица 4

Прибыль при разных отпускных ценах на водород

Рыночная стоимость водорода (€/кг)	Цена в евро за 27 кг	PЗ€/МВт·ч	ЭЗ€/МВт·ч при цене на э/э 20 €/МВт	Прибыль €/МВт·ч
2	54	31,32	27	0
3	81	31,32	27	22
4	108	31,32	27	76
5	135	31,32	27	103
6	162	31,32	27	130
7	189	31,32	27	157
8	216	31,32	27	184

В качестве примера можно предположить, что отпускная цена водорода составляет 6,00 евро/кг. ТЭС может продавать 1 МВт·ч электроэнергии за 20 евро. С другой стороны, из 1 МВт·ч электроэнергии ТЭС может производить 27 кг водорода, которые можно продать по 6 евро/кг и заработать 167 евро. Поскольку 31,32 евро покрывают расходы на оборудование (К) и (О), а 27 евро - это расходы на электроэнергию (это то, что могла бы заработать ТЭС при продаже 1 МВт·ч электроэнергии), оставшаяся прибыль составляет 130 евро.

Нужно иметь ввиду, что полученные затраты на электроэнергию, вырабатываемую ТЭС с ПГУ, будут примерно в 1,5 ниже, чем затраты на производство того же количества водорода, вырабатываемого на традиционных ТЭС.

Результаты

«Зеленый» водород является многообещающим решением для декарбонизированной энергетической системы, и 2020 год ознаменовался «взрывным» вниманием к его использованию во всем мире. Татарстан, как один из ведущих экономически развитых регионов России мог бы принять участие в производстве водорода самой высокой степени очистки на ТЭС с ПГУ за счет меньших затрат на электроэнергию по сравнению с паровыми турбинами, конструировании мощных электролизеров мегаваттного класса для получения водорода, разработке технологий использования топливных элементов, в том числе для грузового автотранспорта и твердотельных высокотемпературных для большой энергетики, внедрении технологий утилизации газообразных водородсодержащих отходов нефтехимических производств для выработки тепловой и электроэнергии на ТЭС, научных исследованиях и подготовке высококвалифицированных специалистов в области водородной энергетики. По проведенным расчетам производство наиболее экологически чистого водорода на ТЭС с ПГУ в Татарстане в настоящее время обойдется в среднем 2 евро за килограмм, что значительно ниже существующей рыночной стоимости.

Заключение

Ожидаемый рост выбросов парниковых газов и сильная зависимость от ископаемых источников энергии являются вескими причинами для перехода к новым альтернативам и стимулом для промышленных субъектов инвестировать в различные новые технологии «зеленой» энергии. Водород является многообещающим переносчиком энергии, но современные методы производства и эксплуатации не соответствуют долгосрочным экологическим и энергетическим целям. В Татарстане, как в одном из самых экономически развитых регионов Российской Федерации, уже сейчас проектируются грузовые автомобили и автобусы на топливных элементах и имеется промышленное производство водорода, как чистого, так и загрязненного побочными продуктами. Но производство требует значительного расширения, с акцентированием на «зеленом», как наиболее востребованном водороде. Кроме того, водород производится на местах использования, т.е. необходимо разрабатывать и внедрять системы доставки его в другие регионы и страны. Цена производства «зеленого» водорода на ТЭС с ПГУ в Татарстане с использованием системы электролиза ниже, чем рыночная цена на водород, прогнозируемая различными исследованиями на следующее десятилетие. Таким образом, Татарстан вполне может стать конкурентоспособным регионом по производству и дистрибуции «зеленого» водорода.

Литература

1. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д и др. Современные направления развития водородных энергетических технологий // Надежность и безопасность энергетики. 2019. Т.12.№2. С. 89-96.
2. Информационно-аналитическое издание Инфраструктурного центра EnergyNetНТИ / EnergyTransition (hydrogen) №39 декабрь 2020 г.
3. Информационно-аналитическое издание Инфраструктурного центра EnergyNetНТИ / EnergyTransition (hydrogen) №40 декабрь 2020 г.
4. Fraile D., Lanoix J.C., Maio P., et al. Overview of the Market Segmentation for Hydrogen Across Potential Customer Groups, Based on Key Application Areas. European Commission, 2015. Available online: http://www.certifhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf
5. Dincer I. Green methods for hydrogen production // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. 37. P. 1954–1971.
6. IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal / International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2020.
7. International Energy Agency. The Future of Hydrogen, Seizing Today's Opportunities/ International Energy Agency: Paris, France. 2019.
8. Mazza A., Bompard E., Chicco G. Applications of power to gas technologies in emerging electrical systems // Renew. Sustain. Energy Rev. 2018. № 92. P. 794–806.
9. Kaushal A., Van Hertem D., Hertem D. An overview of ancillary services and HVDC systems in European context // Energies. 2019. №12. P. 3481.
10. Jovan D.J., Dolanc G. Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions // Energies. 2020. №13. P. 6599. <https://doi.org/10.3390/en13246599>

11. Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., и др. Современные возможности подготовки ультрачистой воды для питания высокопроизводительных котельных установок // Труды академэнерго.2020. № 3. С. 56-66.
12. Филимонов А.Г., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., и др. Особенности перехода Казани на АИТП при реализации комплексной программы повышения эффективности системы теплоснабжения // Вестник КГЭУ. 2019. Т. 11. № 2 (42). С. 127-137.
13. Lewandowska-Bernat A., Desideri U. Opportunities of power-to-gas technology in different energy systems architectures // Appl. Energy. 2018. № 228. P. 57–67.
14. Schiebahn S., Grube T., Robinius M., et al. Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. № 40. P. 4285–4294.
15. Van Leeuwen C., Mulder M. Power-to-gas in electricity markets dominated by renewables // Appl. Energy. 2018. №232. P. 258–272.
16. Fischer D., Kaufmann F., Selinger-Lutz O., et al. Power-to-gas in a smart city context - Influence of network restrictions and possible solutions using on-site storage and model predictive controls // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. №43. P. 9483–9494.
17. Chen Z., Zhang Y., Ji T., et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded // J. Mod. Power Syst. CleanEnergy. 2018. №6. P. 495–508.
18. INFOMINE Research Group. Обзор рынка водорода и оборудования для его производства в России, 3 издание Москва апрель, 2018 <http://www.infomine.ru/research/14/248>
19. NELHydrogen. Containerized Atmospheric Alkaline Electrolyser. Availableonline: <https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>

Авторы публикации

Филимонова Антонина Андреевна – канд. мед. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета.

Чичиров Андрей Александрович – д-р химич. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета.

Чичирова Наталия Дмитриевна - д-р химич. наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета.

Печенкин Александр Вадимович – аспирант кафедры «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, et al. Modern directions of development of hydrogen energy technologies. *Reliability and safety of energy*. 2019;12(2):89-96.
2. Information and analytical edition of the Infrastructure Center EnergyNet NTI. *Energy Transition* (hydrogen) №39 December 2020
3. Information and analytical edition of the Infrastructure Center EnergyNet NTI. *Energy Transition* (hydrogen) №40 December 2020
4. FraileD, Lanoix JC, Maio P, et al. *Overview of the Market Segmentation for Hydrogen Across Potential Customer Groups, Based on Key Application Areas*. European Commission, 2015. Availableonline: http://www.certifhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf
5. Dincer I. Green methods for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2012;3:1954–1971.
6. IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi. 2020.
7. International Energy Agency. The Future of Hydrogen, Seizing Today's Opportunities *International Energy Agency*: Paris, France. 2019.
8. Mazza A, Bompard E, Chicco G. Applications of power to gas technologies in emerging electrical systems. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2018;92:794–806.
9. Kaushal A, Van Hertem D, Hertem D. An overview of ancillary services and HVDC systems in European context. *Energies*. 2019;12:3481.
10. Jovan DJ, Dolanc G. Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions. *Energies*. 2020;13:6599. <https://doi.org/10.3390/en13246599>.

11. Filimonova AA, Chichirova ND, Chichirov A.A., et al. Modern possibilities for the preparation of ultrapure water for power supply of high-performance boiler plants. *Trudy Akadenergo*. 2020;3:56-66.
12. Filimonov AG, Filimonova AA, Chichirova ND, et al. Features of Kazan's transition to AITP in the implementation of a comprehensive program to improve the efficiency of the heat supply system. *Bulletin of KGEU*. 2019;11(2):(42):127-137.
13. Lewandowska-Bernat A, Desideri U. Opportunities of power-to-gas technology in different energy systems architectures. *Appl. Energy*. 2018;228:57-67.
14. Schiebahn S, Grube T, Robinius M, et al. Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015;40:4285–4294.
15. Van Leeuwen C, Mulder M. Power-to-gas in electricity markets dominated by renewable. *Appl. Energy*. 2018;232:258–272.
16. Fischer D, Kaufmann F, Selinger-Lutz O, et al. Power-to-gas in a smart city context - Influence of network restrictions and possible solutions using on-site storage and model predictive controls. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018;43:9483–9494.
17. Chen Z, Zhang Y, Ji T, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded. *Mod. PowerSyst. Clean Energy*. 2018;6:495–508.
18. INFOMINE Research Group. 2018. Available at: <http://www.infomine.ru/research/14/248/>.
19. NELHydrogen. Containerized Atmospheric Alkaline Electrolyser. Available at: <https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>.

Authors of the publication

Antonina A. Filimonova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Natalya D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexander V. Pechenkin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

23 ноября 2020г.

Отредактировано

8 декабря 2020г.

Принято

8 декабря 2020г.



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов

Уфимский государственный авиационный технический университет,
г. Уфа, Россия

Резюме: Провалы напряжения достаточно частое и опасное явление, которое может привести к нарушению технологического процесса производства. Обеспечение сохранения устойчивости асинхронных двигателей при провалах напряжения является важной задачей обеспечения непрерывности технологического процесса, а также снижения материальных убытков. **ЦЕЛЬ.** Привести основные причины провалов напряжения. Разработать имитационную модель, соответствующую типовой схеме электроснабжения нефтеперекачивающей насосной станции с группой асинхронных двигателей в качестве нагрузки. Выполнить две серии расчетов по определению параметров электрического режима при провалах напряжения и последующем восстановлении напряжения на шинах питающей подстанции. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялся программный комплекс PSCAD. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, приведены основные причины провалов напряжения. Выполнено моделирование провалов напряжения, возникающих в результате короткого замыкания на оборудовании подстанции. Выполнены серии расчетов, отличающиеся друг от друга измененными исходными данными: место возникновения короткого замыкания (далее – КЗ), выдержка времени автоматического ввода резерва (далее – АВР). Выполнен анализ полученных результатов. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** По результатам проведения испытаний видно, что снижение напряжения на шинах низшего напряжения подстанций после работы АВР тем ниже, чем больше выдержка времени АВР. В настоящей работе максимальная выдержка времени составляла 7 секунд, при этом, нарушения устойчивости асинхронных двигателей не возникло. Также определена необходимость исследования работы группы асинхронных двигателей при авариях во внешней электрической сети.

Ключевые слова: асинхронный, двигатель, провал, напряжения, пуск, самозапуск.

Для цитирования: Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.

RESEARCH OF THE OPERATION OF A GROUP OF ASYNCHRONOUS MOTORS AT SHORT-TERM VOLTAGE SLOPES FOR THE CONDITIONS OF THE OIL INDUSTRY

RR. Sattarov, RR. Garafutdinov

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Abstract: Voltage dips are quite frequent and dangerous phenomenon, which can lead to disruption of the production process. Ensuring the stability of induction motors during voltage dips is an important task to ensure the continuity of the technological process, as well as to reduce material losses. **THE PURPOSE.** List the main causes of voltage dips. Develop a simulation model corresponding to a typical power supply scheme for an oil pumping station with a group of asynchronous motors as a load. Perform two series of calculations to determine the parameters of

the electrical mode in case of voltage dips and the subsequent restoration of the voltage on the buses of the supply substation. **METHODS.** When solving the problem, the PSCAD software package was used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, the main causes of voltage dips are given. The simulation of voltage dips resulting from a short circuit on the substation equipment has been performed. A series of calculations were performed, differing from each other in the changed initial data: the place of occurrence of a short circuit, the time delay of automatic transfer of the reserve. The analysis of the obtained results is carried out. **CONCLUSION.** According to the test results, it can be seen that the decrease in voltage on the low voltage buses of substations after the operation of automatic transfer switch is the lower, the longer the time delay of automatic transfer switch. In this work, the maximum time delay was 7 seconds, while there was no violation of the stability of the induction motors. The need to study the operation of a group of asynchronous motors in case of accidents in an external electrical network is also determined.

Keywords: asynchronous, motor; failure; voltage; start; self-launch.

For citation: Sattarov RR, Garafutdinov RR. research of the operation of a group of asynchronous motors at short-term voltage slopes for the conditions of the oil industry *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.

Введение

Провал напряжения это внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9 U_{ном}$, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд.

Несмотря на то, что проявления отклонения напряжения имеют случайный характер, вероятность этого события зависит от вполне определенных причин. Основные причины возникновения провалов напряжения в электрических сетях приведены на рис. 1 [1-4].

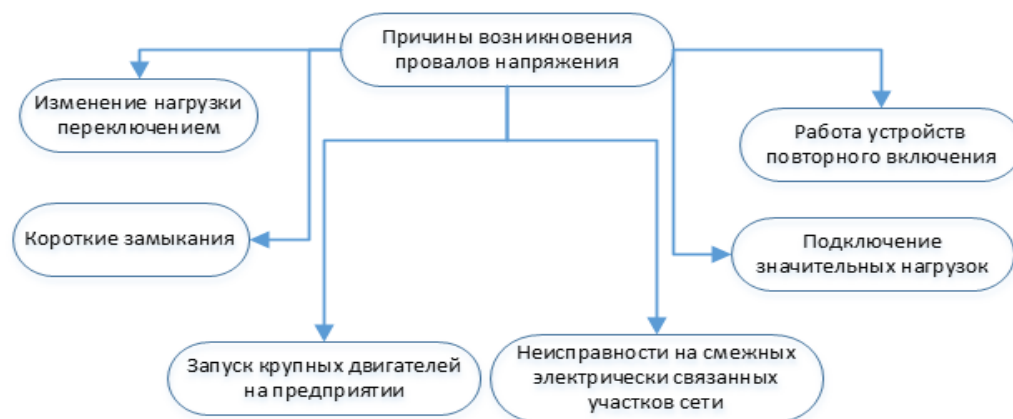


Рис. 1. Основные причины возникновения провалов напряжения

Данное явление считается менее опасным отклонения частоты и импульсов напряжения, но, тем не менее, провалы могут привести к следующим последствиям:

- понижению интенсивности светового потока, производимого источниками с нитью накала;
- ложным срабатываниям электронных систем управления;
- понижению уровня постоянного тока в контактной сети электротранспорта, что негативно отражается на работе подвижного состава;
- изменению характеристик преобразователей напряжения;
- падению мощности электродвигателей, что приводит к повышенным потерям электроэнергии и износу;
- нарушению технологического процесса производства и связанным с этим экономическим убыткам.

Основными потребителями электроэнергии на промышленных предприятиях, в том числе и в нефтяной промышленности, являются асинхронные электродвигатели (далее – АД) [5-9]. Исследование работы АД при кратковременных провалах напряжения является актуальной задачей, поскольку обеспечение возможности восстановления их нормальной работы после провалов напряжения позволит значительно снизить материальные затраты вследствие исключения останова АД и нарушения производственного процесса [10-13].

В данной работе выполнено исследование работы группы АД при кратковременных провалах напряжений.

Описание имитационной модели

Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса PSCAD [14-15]. Разработана типовая схема электроснабжения нефтеперекачивающей насосной станции [16], которая представляет собой понижающую подстанцию 35/10 кВ с расположенными на шинах низшего напряжения (10кВ) тремя АД (рис. 2).

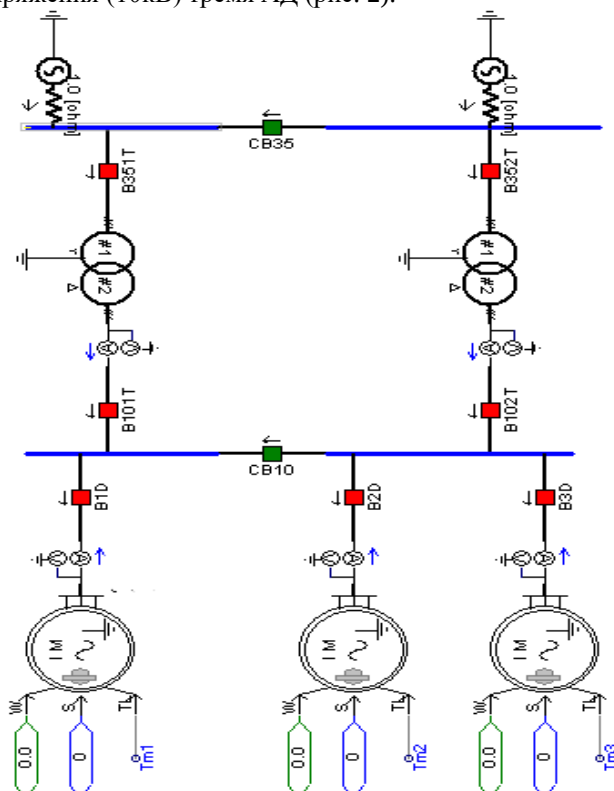


Рис. 2. Типовая схема электроснабжения с двумя секциями шин

Подстанция питается от сети внешнего электроснабжения напряжением 35 кВ. Шины 35 кВ и 10 кВ нормально секционированы.

На подстанции установлено два силовых трансформатора ТМН-10000/35 напряжением 35/10 кВ и мощностью 10 МВА каждый. Параметры указанных трансформаторов приведены в [17].

К шинам 10 кВ подключено три АД типа 4А3МВ-1600. Распределение по секциям следующее: один АД на 1 секции шин (далее – сек.ш.) 10 кВ и два АД на 2 сек.ш. 10 кВ. Характер нагрузки, подключенной к АД, соответствует центробежному насосу без противодействия [18-19].

Моделирование характера нагрузки в программном комплексе PSCAD выполняется путем задания уравнения изменения момента на валу АД в зависимости от его скорости (рис. 3).

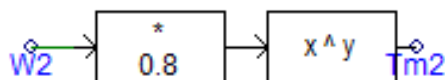


Рис. 3. Уравнение изменения момента на валу АД в зависимости от его скорости, соответствующее центробежному насосу в режиме без противодавления (значение $y=1,4$)

Проведение испытаний

На разработанной модели было выполнено последовательно два испытания:

1) КЗ на 1 сек.ш. 35 кВ и его отключение действием РЗА. В результате пропадает напряжение на 1 сек.ш. 10 кВ на время действия АВР на СВ10;

2) КЗ на 2 сек.ш. 35 кВ и его отключение действием РЗА. В результате пропадает напряжение на 2 сек.ш. 10 кВ на время действия АВР на СВ10.

Так, программа первого испытания следующая:

1. Пуск моделирования;
2. Возникновение КЗ на 1 сек.ш. 35 кВ и отключение В351Т и СВ35($t=3$ с);
3. Погашение 1 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t=3-8$ с);
4. Работа АВР 10 кВ и включение СВ10, подача напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t=8$).

Результаты первого испытания приведены на рис. 4 и 5.

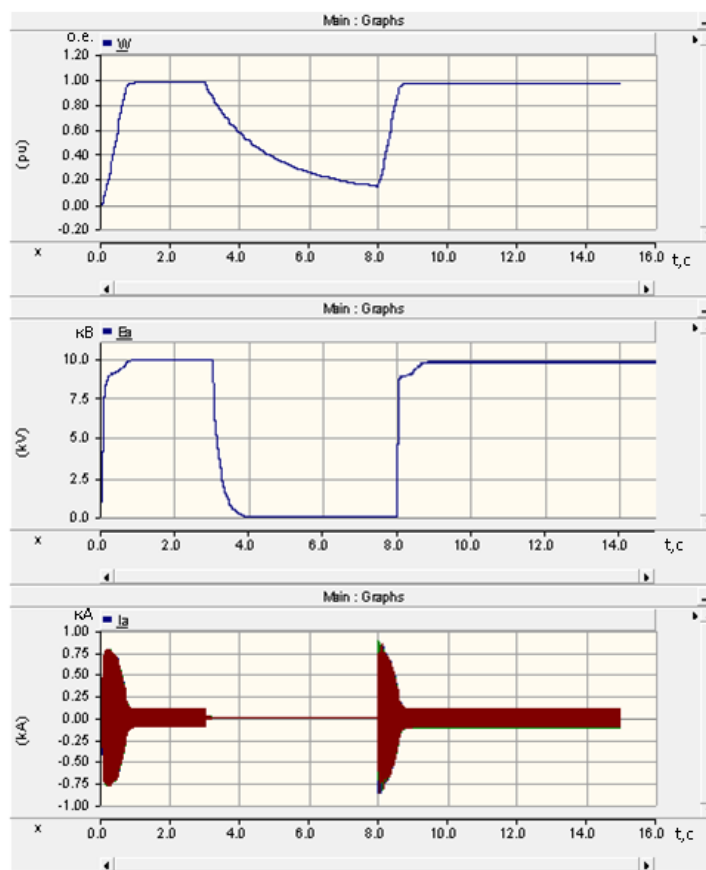


Рис. 4. Графики изменения параметров АД-1 при проведении испытаний.

W – скорость вращения АД относительно номинального значения; Ea – напряжение на выводах АД;

Ia – ток на выводах АД.

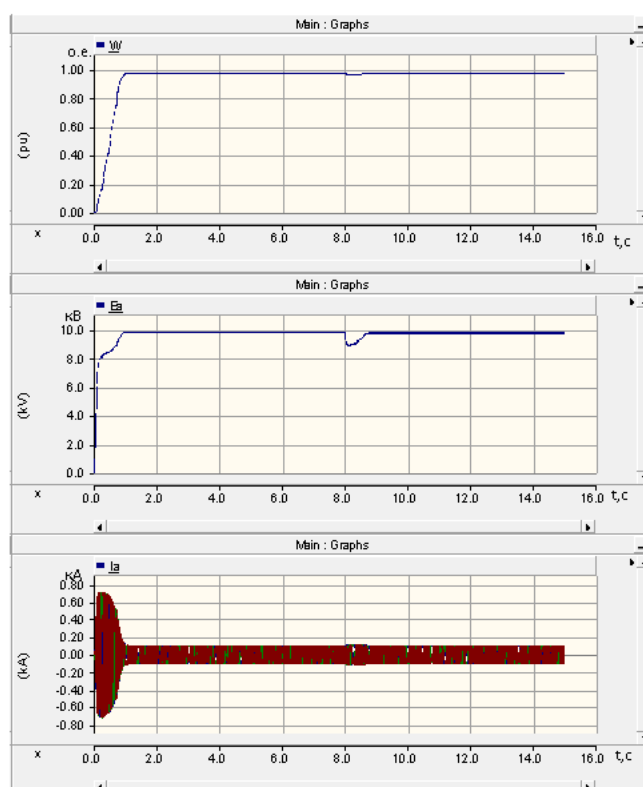


Рис. 5. Графики изменения параметров АД-2 при проведении испытаний.

W – скорость вращения АД относительно номинального значения;

E_a – напряжение на выводах АД;

I_a – ток на выводах АД.

Дополнительно, была выполнена серия расчетов, с целью определения зависимости снижения напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ после работы АВР от длительности провала напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ. В данном случае длительность провала напряжения определяется выдержкой времени срабатывания АВР на СВ10. Серия расчетов выполнялась с использованием инструмента *Multiple Run*, встроенного в *PSCAD*. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов с использованием *Multiple Run*

	Выдержка времени АВР, сек	Величина напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ после работы АВР, кВ
	1,0	8,67
	2,0	8,41
	3,0	8,31
	4,0	8,27
	5,0	8,24
	6,0	8,22
	7,0	8,21

Выводы по результатам первого испытания

1. После работы АВР работа АД-1 восстанавливается.
2. После работы АВР возникает кратковременное снижение напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ из-за перевода питания АД-1 на питание от 2 сек.ш. 10 кВ. И на основании серии расчетов можно сказать, что величина снижения напряжения прямо пропорциональна длительности провала напряжения.
3. Напряжение на выводах АД-2 и АД-3 после работы АВР кратковременно снижается с 10 кВ до 9 кВ (в первом расчете серии) и не приводит к нарушению устойчивости (во всей серии расчетов). При этом ток на выводах АД-2 и АД-3 увеличивается незначительно.
4. После работы АВР скорость вращения АД-2 и АД-3 снижается кратковременно и незначительно.

Программа второго испытания следующая:

1. Пуск моделирования;
2. Возникновение КЗ на 2 сек.ш. 35 кВ и отключение В352Т и СВ35 ($t = 3$ с);
3. Погашение 2 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t = 3-8$ с);
4. Работа АВР 10 кВ и включение СВ10, подача напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t = 8$ с).

Результаты второго испытания приведены на рис. 6 и 7.

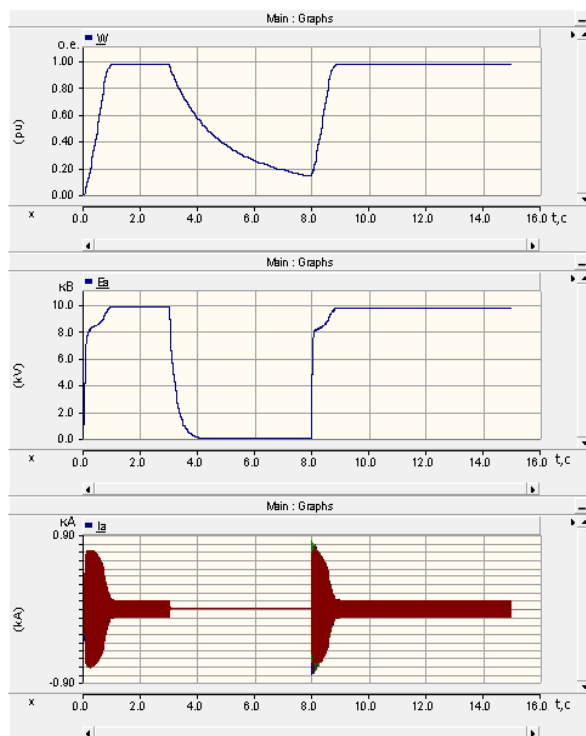


Рис. 6. Графики изменения параметров АД-2 (АД-3) при проведении испытаний:

W – скорость вращения АД относительно номинального значения;

E_a – напряжение на выводах АД;

I_a – ток на выводах АД.

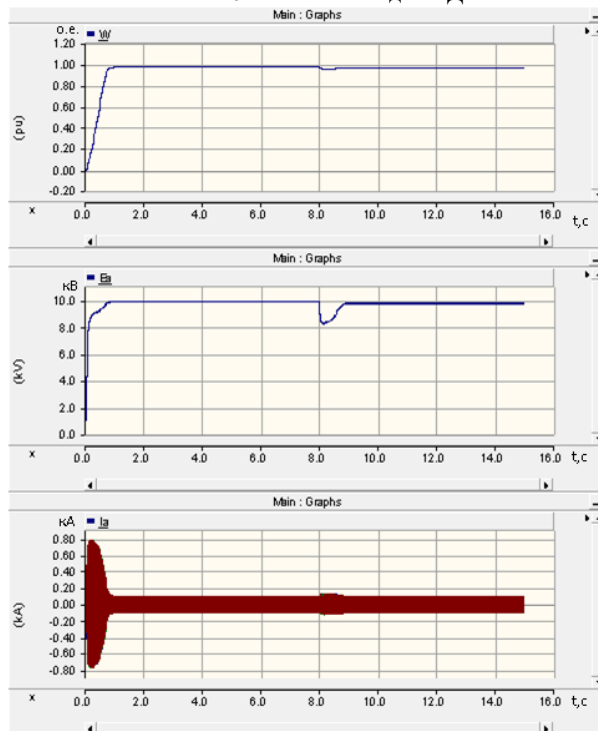


Рис. 7. Графики изменения параметров АД-1 при проведении испытаний:

W – скорость вращения АД относительно номинального значения;

E_a – напряжение на выводах АД;

I_a – ток на выводах АД.

Аналогично первому испытанию была выполнена серия расчетов, с целью определения зависимости снижения напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ после работы АВР от длительности провала напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ. В данном случае длительность провала напряжения определяется выдержкой времени срабатывания АВР на СВ10. Результаты расчетов приведены в табл. 2

Таблица 2

Результаты расчетов с использованием <i>Multiple Run</i>		
	Выдержка времени АВР, сек	Величина напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ после работы АВР, кВ
	1,0	8,67
	2,0	8,41
	3,0	8,31
	4,0	8,27
	5,0	8,24
	6,0	8,22
	7,0	8,21

Выводы по результатам второго испытания

1. После работы АВР работа АД-2 и АД-3 восстанавливается.
2. После работы АВР возникает кратковременное снижение напряжения на 1 сек. ш. 10 кВ из-за перевода питания АД-2 и АД-3 на питание от 1 сек. ш. И на основании серии расчетов можно сказать, что величина снижения напряжения прямо пропорциональна длительности провала напряжения.
3. Напряжение на выводах АД-1 после работы АВР кратковременно снижается с 10 кВ до 8 кВ (в первом расчете из серии) и не приводит к нарушению устойчивости АД-1(во всей серии расчетов). При этом ток на выводах АД-1 увеличивается незначительно
4. После работы АВР скорость вращения АД-1 снижается кратковременно и незначительно.

Заключение

По результатам проведения испытаний видно, что снижение напряжения на шинах 10 кВ после работы АВР тем ниже, чем больше выдержка времени АВР. В настоящей работе максимальная выдержка времени составляла 7 секунд, при этом, нарушения устойчивости АД не возникло. Однако, нарушение устойчивости АД может произойти и при выдержке времени 7 секунд и ниже в условиях, отличных от рассматриваемых в настоящей работе (аварии во внешней сети, иной характер нагрузки на АД, большее количество АД на шинах и более высокая мощность АД). Анализ возможности нарушения устойчивости при иных схемно-режимных условиях следует выполнять дополнительно.

Литература

1. Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В., Гареев А.Ш. и др. Негативное влияние провалов напряжения на потребителей и способы его уменьшения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. V. 18. № 3 (64).
2. Liao H., Milanovic J., Rodrigues M., et al. Voltage Sag Estimation in Sparsely Monitored Power Systems Based on Deep Learning and System Area Mapping // IEEE Transactions on Power Delivery, 1–1.2018.
3. Felce A., Matas G., Da Silva Y. Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors // Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc). 2004. V. 4. pp. 2573–2578.
4. Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. №2. С. 43-50.
5. Garnica Lopez M. A., Garcia de Vicuna J. L., Miret J., et al. Control Strategy for Grid-Connected Three-Phase Inverters During Voltage Sags to Meet Grid Codes and to Maximize Power Delivery Capability // IEEE Transactions on Power Electronics, V. 33. N11. pp. 9360–9374.2018.
6. De Santis M., Noce C., Varilone P., et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks // Electric Power Systems Research. 2018. V. 154. pp. 391–400.

7. Николаев А.А., Денисевич А.С., Ложкин И.А. и др. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК METALURJI на работу главных электроприводов стана горячей прокатки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 3 (28).
8. Gomez J.C., Morcos M.M. A simple methodology for estimating the effect of voltage sags produced by induction motor starting cycles on sensitive equipment // *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc.* 2001. Vol. 2, № C. pp. 1196–1199.
9. Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2019. Т. 21 № 1-2. С. 131-140.
10. Wang Z., Zhu K., Wang X. An analytical method to calculate critical clearance time of symmetrical voltage sags for induction motors // *Dianwang Jishu. Power Syst. Technol.* 2014. V. 38. № 2. pp. 509–514.
11. Ojaghi M., Faiz J., Shahrouzi H. et al. Induction motors performance study under various voltage sags using simulation // *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2012. V.1. N.3. pp.32- 39.
12. Sattarov R. R., Morozov P. V. Physical approach to analysis of induction motor braking under machinery load // *Journal of Physics: Conference Series* 2020. pp.1-5.
13. Bollen M.H.J., Yalcinkaya G., Hazza G. The use of electromagnetic transient programs for voltage sag analysis // *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*. 1998. V. 1. P. 598–603.
14. Гарафутдинов Р.Р., Саттаров, Р.Р. Моделирование усовершенствованной автоматики ограничения перегрузки оборудования // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2020. Т. 20. № 1. С. 30–37.
15. Sattarov R.R. et al. Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Students // *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. IEEE, 2019. P. 1–6.
16. Gomez J.C., Morcos M.M., Reineri C.A. et al. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2002. V. 17. № 2. P. 434–440.
17. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.:ЭНАС. 2012. 376 с.: ил.
18. Petronijević M., Mitrović N., Kostić V., Banković B. An Improved Scheme for Voltage Sag Override in Direct Torque Controlled Induction Motor Drives // *Energies*. 10(5). С. 663–2017.
19. Галеев Л.М. Исследование напряжения в линейно нагруженной электрической сети, образованного плоской электромагнитной волной // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22. № 4. С. 54-63.

Авторы публикации

Саттаров Роберт Радикович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханики» Уфимского государственного авиационного технического университета. г. Уфа. e-mail: sattar.rb@gmail.com.

Гарафутдинов Рустам Разифович — аспирант кафедры «Электромеханики» Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа. e-mail: garafutdinov_r_r@mail.ru

References

1. Ismagilov FR, Maksudov DV, Gareev ASH. et al. Adverse effect on consumer voltage sags and the way it reduction. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;18(3):64.
2. Liao H, Milanovic J, Rodrigues M, et al. Voltage Sag Estimation in Sparsely Monitored Power Systems Based on Deep Learning and System Area Mapping. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1.2018. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2865906.
3. Felce A, Matas G, Da Silva Y. Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors. *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)* 2004;4:2573–2578. doi: 10.1109/IAS.2004.1348838.

4. Sekretarev YA, Menyakin DA. Features of calculations of consequences of failures of power supply in distribution networks with the monoconsumer of electric energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):43-50. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-43-50>
5. Garnica Lopez M.A, Garcia de Vicuna JL, Miret J, et al. Control Strategy for Grid-Connected Three-Phase Inverters During Voltage Sags to Meet Grid Codes and to Maximize Power Delivery Capability/ *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(11):9360–9374.
6. De Santis M, Noce C, Varilone P, et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks. *Electric Power Systems Research*. 2018;154:391-400.
7. Nikolaev AA, Denisevich AS, Lozhkin IA. et al. Investigation of voltage drops' influence in the power supply system of the "MMK METALURJI" ironworks on the main electric drives of the hot strip mill. *Electrotechnical systems and complexes*. 2015;3(28).
8. Gomez JC, Morcos M.M. A simple methodology for estimating the effect of voltage sags produced by induction motor starting cycles on sensitive equipment. *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc.* 2001;2(C): 1196–1199. doi: 10.1109/IAS.2001.955648.
9. Zolotov II, Shevcov AA. Influence of electricity consumers on the autonomous power supply systems voltage form. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):131-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140>.
10. Wang Z, Zhu K, Wang X. An analytical method to calculate critical clearance time of symmetrical voltage sags for induction motors. *Dianwang Jishu/Power Syst. Technol.* 2014;38(2):509-514.
11. Ojaghi M, Faiz J, Shahrrouzi H. et al. Induction motors performance study under various voltage sags using simulation. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2012; 1(3):32-9. doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073348.
12. Sattarov RR, Morozov PV. Physical approach to analysis of induction motor braking under machinery load. *Journal of Physics: Conference Series* 2020.2020:1-5.
13. Bollen M.H.J, Yalcinkaya G, Hazza G. The use of electromagnetic transient programs for voltage sag analysis. *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP. Power, ICHQP.* 1998;1(1):598-603.. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759977.
14. Sattarov RR, Garafutdinov RR. Modeling Advanced Automatic Overcurrent Limiting System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020;20(1);30–37. doi:10.14529/power200104.
15. Sattarov RR. et al. Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Students. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. IEEE, 2019;1-6. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950001.
16. Gomez JC, Morcos MM, Reineri CA. et al. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2002;17(2); 434–440. doi: 10.1109/61.997914.
17. Fajbisovich DL. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej*. 4 ed. Moscow.: ENAS, 2012.
18. Petronijevic M, Mitrović N, Kostić V. et al. An Improved Scheme for Voltage Sag Override in Direct Torque Controlled Induction Motor Drives. *Energies*. 2017;10(5);663–665. doi: 10.3390/en10050663.
19. Galeev LM. Investigation of the plane wave coupling to a linearly loaded transmission line network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):54-63. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-54-63>.

Authors of the publication

Robert R. Sattarov – Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

.

Rustam R. Garafutdinov – Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

Получено

20 ноября 2020 г.

Отредактировано

14 декабря 2020г.

Принято

14 декабря 2020г.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ШЛАКОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТА ПРИ СЖИГАНИИ НЕПРОЕКТНЫХ ТОПЛИВ

Е.А. Бойко, И.В. Загородний

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата БКЗ-420-140 с твердым шлакоудалением Абаканской ТЭЦ при сжигании непроектных топлив. *МЕТОД.* При рассмотрении проблем шлакования использовались комплексные (экспериментально-расчетные) исследования факторов и условий шлакования поверхностей нагрева котельного агрегата при сжигании углей переменного качества в широком диапазоне изменения их технических характеристик и состава минеральной части. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены качественные и количественные параметры оценки шлакующих свойств непроектных углей и их поведения в реальных условиях работы радиационных, полурadiационных и конвективных поверхностей нагрева с учетом их режимных и конструктивных особенностей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* По результатам комплексных исследований получено, что к числу наиболее рациональных мероприятий по использованию непроектных углей на котле БКЗ-420-140 ТШУ Абаканской ТЭЦ относятся модернизация применяемых средств очистки (обдувочных аппаратов) и системы их активации, а также научно-обоснованный выбор оптимального соотношения смеси проектного и непроектного топлива по условию минимальной интенсивности процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева. Анализ шлакующих и загрязняющих свойств непроектных углей позволяет выполнять прогноз изменения характеристик тепловой эффективности поверхностей нагрева и разработать ряд практических рекомендаций по оптимизации параметров работы средств очистки, установленных на котле.

Ключевые слова: непроектные угли, котельный агрегат, поверхности нагрева, шлакование, экспертная оценка, тепловой расчет.

Для цитирования: Бойко Е.А., Загородний И.В. Комплексное исследование интенсивности шлакования поверхностей нагрева котлоагрегата при сжигании непроектных топлив // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 101-116. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116.

INTEGRATED RESEARCH OF SLAGING INTENSITY OF THE BOILER UNIT HEATING SURFACES WHEN BURNING NON-PROJECT FUELS

ЕА. Boiko, IV. Zagorodnii

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* Comprehensive research of the slagging intensity is the heating surfaces of the BKZ-420-140 boiler unit with solid slag removal at the Abakan CHP when burning non-project fuels. The relevance of the work is due to the technical necessity and economic feasibility of conversion boiler units to combustion of non-design coals. *METHODS.*

The problem has been analyzed by methodology for conducting complex tests, measurements and processing of experimental data, as well as the results of experimental and computational studies of a boiler unit when operating on coals of various qualities. **RESULTS.** Qualitative and quantitative parameters for assessing the properties of off-design coals and their behavior in real operating conditions of radiation, semi-radiation and convective conditions, taking into account their modes and design functions, have been obtained. **CONCLUSION:** A computational analysis of the operating modes of boiler units when burning non-design fuels showed that a promising technology for involving non-design coals in the fuel and energy balance of a thermal power plant is providing a scientifically based mixture of design and non-design fuels. Analysis of the slagging and polluting properties of non-design coals makes it possible to predict changes in the characteristics of the thermal efficiency of heating surfaces and to develop many practical recommendations for optimizing the parameters of the cleaning equipment installed on the boiler. Also, mixtures of fuels were determined for which the wall temperatures of the metal of the outlet stack of the superheater increase, which significantly reduces the strength characteristics of the surface. The assessment and prediction of the reliability of the heating surface is carried out by calculating the temperature of the metal wall in the most heat-stressed place.

Key words: non-standard coals, boiler unit, heating surfaces, slagging, expert review, thermal calculation.

For citation: Boiko EA., Zagorodnii IV. Integrated research of slagging intensity of the boiler unit heating surfaces when burning non-project fuels. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):101-116. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116.

Введение

Одним из основных рынков, участником, которого выступают генерирующие энергетические предприятия, является рынок топливных ресурсов, а доля топливной составляющей в себестоимости энергии фактически превышает 50%. В связи с этим обеспечение конкурентоспособности энергетических компаний в значительной степени зависит от детального изучения проблем топливоиспользования.

Ранее все тепловые электростанции (ТЭС) проектировались на сжигание углей конкретных месторождений (как правило, близлежащих), поэтому в новых конкурентных условиях рынка углеставок весьма актуален поиск технологических и экономических критериев взаимозаменяемости углей. Эта информация необходима при построении энергогенерирующими предприятиями эффективной системы управления издержками и бизнес-планирования [1, 2].

Наиболее остро при сжигании непроектных углей на котельных агрегатах ТЭС встаёт проблема шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, что приводит к снижению паропроизводительности котельного агрегата, росту затрат на очистку и расшлаковку поверхностей нагрева, снижению надёжности работы теплообменных поверхностей [3,4].

Таким образом, для обеспечения экономичной и надёжной бесшлаковочной работы котельных агрегатов при изменении качества сжигаемого топлива и режимов работы оборудования имеют большую значимость работы по проведению комплексных исследований процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов при сжигании непроектных топлив. Для достижения вышеуказанной цели требуется решение следующих задач [5]:

- проведение экспериментально-расчётных исследований процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева при сжигании различных непроектных углей;
- выполнение экспертной и расчётной оценки влияния качества непроектных углей на шлакующие и загрязняющие показатели работы котельных агрегатов;

- проведение исследования тепловой эффективности работы поверхностей нагрева котельных агрегатов при сжигании непроектных;
- выполнение аналитических исследований процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева с учётом режимных и конструктивных особенностей котельных агрегатов, а также расчётного анализа температурных режимов работы поверхностей нагрева котлоагрегатов при сжигании непроектных углей с последующей оценкой надёжности их работы.

Объект и методы исследования

Объектом для отработки методики комплексных исследований послужил вертикальный водотрубный паровой котел с естественной циркуляцией и твердым шлакоудалением БКЗ-420-140Абаканской ТЭЦ, работающий на проектом бородинском угле, с прогнозом использования широкой гаммы непроектных топлив различных месторождений: канский, черноморский, изыхский, харанорский, назаровский, черноморский отсев, элестинский и березовский, – а также нескольких соотношений смесей непроектных углей с проектным топливом.

Испытания котельного агрегата проводились по стандартной методике [6]. Основные штатные параметры работы котельного агрегата фиксировались по приборам щита управления котлом. Присосы воздуха в топку и газоход пароперегревателя определялись упрощенным методом Южтехэнерго в зависимости от поддерживаемого в топке разрежения. Присосы холодного воздуха в конвективную шахту котла оценивались по результатам газового анализа. Температуры газов по высоте топки замерялись с помощью оптического пирометра «Testo».

Шлакующие свойства топлива определялись по методике ВТИ с помощью неохлаждаемых зондов [7]. Использование неохлаждаемых зондов допустимо при изучении влияния отдельных факторов на интенсивность образования и свойства первичных отложений с высоким содержанием оксидов железа. Первичные отложения, отобранные с помощью неохлаждаемых зондов, качественно характеризуются теми же свойствами, что и отобранные с поверхностей нагрева котла.

Исследование свойств и условий образования рыхлых отложений осуществлялось методом, разработанным ВТИ, с использованием водоохлаждаемых переносных торцевых пробоотборников со съёмной бобышкой [8]. Возможность изменения продолжительности выдержки пробоотборников в газоходе позволяет проследить процесс образования отложений, что является важным с точки зрения механизма их образования.

Образование отложений золовых частиц на низкотемпературных поверхностях нагрева изучалось с помощью зонда, представляющего собой, трубу в трубе, помещаемого в газоход котла. С помощью таких зондов проводилось исследование влияния на интенсивность отложений различных режимных факторов (коэффициента избытка воздуха, температуры стенки и др.).

Для изучения механизма образования отложений путем анализа фазовых превращений, происходящих в летучей золе, использовались специальные методы лабораторных исследований минеральной части топлива, летучей золы и отложений.

Вещественный (минералогический) состав, или форма соединений в минеральной части, в значительной степени определяет способность золы к спеканию, образованию легкоплавких эвтектических смесей. Для исследования минерального состава использовалось несколько методов: оптической и электронной микроскопии; дифференциально-термографический анализ; анализ содержания и состава водорастворимых соединений; кристаллооптические исследования. Характер отложений на поверхностях нового типа изучался с помощью байпасных газоходов.

Целью проводимых испытаний в период опытного сжигания проектного и непроектного угля являлось:

- получение характеристик работы котла в период опытного сжигания – основных тепловых характеристик работы оборудования для определения бесшлаковочных режимов эксплуатации котлоагрегатов;

- выполнение балансовых испытаний котлоагрегата для определения основных показателей работы котла при сжигании проектного и непроектного угля и формирования режимной карты.

При изучении интенсивности процессов шлакования топочной камеры и пароперегревателей котельного агрегата были использованы основные положения методики УралВТИ и УрФУ (УПИ) [9], согласно которой основными характеристиками шлакующих свойств углей являются: температура начала шлакования, выше которой наблюдается неограниченный рост вторичных отложений и прочность первичных отложений.

Учитывалось, что температура начала шлакования не связана с плавкостными характеристиками золы, а зависит, прежде всего, от химического состава минеральной части топлива. Данная температура определяется с использованием неохлаждаемых зондов при проведении тепловых испытаний действующих котельных агрегатов или может быть получена расчётным путем [10].

Для определения зависимости интенсивности шлакования от температуры газов золошлаковые отложения взвешивались после извлечения зонда из газохода, снятые с участка зонда длиной 200–250 мм. Скорость образования отложений, приведённая к номинальной нагрузке, рассчитывается по методике ВТИ.

Оценка шлакующих и загрязняющих свойств (ранжирование) углей выполнена с использованием показателей, определяемых по химическому составу зольного остатка, как для отдельных проб, так и для среднего состава (по программе ВТИ-УралВТИ «Coral») [10]. Экспертная оценка шлакующих и загрязняющих свойств энергетических углей основана на анализе поведения минеральной части твёрдых топлив при пылеугольном сжигании и выполняется по следующим параметрам:

- рейтингу топлива, отражающему качественную оценку склонности топлива к образованию золовых отложений и шлакованию поверхностей нагрева;
- температуре начала шлакования;
- предельно допустимым значениям (по условиям шлакования и загрязнения поверхностей) расчётных реперных температур газов в котле и тепловых напряжений сечения топки.

Шлакующие и загрязняющие свойства топлив определяются и оцениваются в зависимости от физико-химических характеристик топлива, состава его минеральной части, а также от условий и режима сжигания.

Рейтинг топлива оценивается по следующим основным показателям загрязнения:

- склонности минеральной части топлива к образованию на поверхностях нагрева наиболее трудноудаляемых видов золовых отложений (железистых, натриевых, сульфатно-кальциевых);

- склонности минеральной части топлива к шлакованию топочных экранов, радиационных и полурadiационных поверхностей нагрева.

Ранжирование топлив осуществляется по четырём группам рейтинга: низкий (Н), средний (С), высокий (В) и очень высокий (ОВ), качественно определяющим характер возможного загрязнения.

Группа рейтинга определяется для каждого показателя загрязнения по индивидуальным безразмерным шкалам (коэффициентам) рейтинга (R). Расчёт коэффициентов рейтинга, а также анализ влияния указанных факторов на значения рейтинга проводится по зависимостям коэффициентов рейтинга от расчётных рейтинговых параметров (Р). Рейтинговые параметры представляют собой безразмерные комплексы, рассчитываемые по содержанию тех элементов состава топлива, компонентов минеральной части и параметров котла, которые определяют рассматриваемый показатель загрязнения.

Сопоставление анализируемого и нормированных топлив по показателям загрязнения позволяет определить топлива-аналоги, обеспечивающие при сжигании примерно такой же характер загрязнения поверхностей нагрева.

Оценка количественных показателей, характеризующих шлакующие свойства энергетических топлив и используемых при проектировании и наладке котлов, производилась для следующих температурных реперов:

- температуре начала шлакования (зависит от состава минеральной части топлива и определяется по базовой зависимости, полученной по экспериментальным данным для нормированных топлив);
- предельно допустимым значениям (по условиям шлакования и загрязнения поверхностей нагрева) расчётных температур газов: температуре на выходе из топки и на входе в конвективную шахту котла.

Оценка предельно допустимых (по условию шлакования) значений тепловых напряжений топки проводилась по реальным параметрам котла для следующих зон и сечений топки:

- общего поперечного сечения топки (зависит от рейтингового параметра P_{re});
- поперечного сечения топки для зоны от холодной воронки до нижнего яруса горелок (зависит от рейтингового параметра $P_{шп}$);
- поперечного сечения зоны активного горения (зависит от рейтингового параметра $P_{шп}$).

Результаты

Эмпирические зависимости для расчёта отдельных параметров, характеризующих шлакующие и загрязняющие свойства энергетических топлив, получены на основе обобщения результатов экспериментальных исследований поведения минеральной части ряда характерных типов топлив (так называемых *нормированных топлив*). По этим данным построены базовые зависимости указанных параметров от физико-химических характеристик топлив и его минеральной части, которые приведены к единым условиям сжигания топлив – *нормированным параметрам котла*.

Получаемые при нормированных параметрах оценки оказываются в большинстве случаев достаточно представительными для прогнозирования шлакующих и загрязняющих свойств топлив и при других режимах сжигания. Уточнение шлакующих и загрязняющих свойств анализируемого топлива осуществляется при учете реальных параметров котла.

Результаты экспертной оценки шлакующих свойств углей и смесей представлены в табл.1.

Анализ шлакующих свойств минеральной части рассматриваемых углей показал, что наивысшая склонность к образованию наиболее прочных железистых отложений, образующихся в основном в топочной камере (см. индексы шлакования топочных экранов и полурадационных поверхностей нагрева) котла относятся канский и назаровский угли. Из числа смесей, наибольшую склонность к образованию железистых отложений проявляет в широком диапазоне соотношение бородинского и черногорского углей.

С точки зрения образования натриевых отложений все рассматриваемые угли и их смеси относятся к классу нешлакующих топлив. Максимальные значения данный индекс принимает для каменных углей изыхского и элегестинского углей.

Склонность к образованию кальциевых отложений, косвенно характеризующих прочность отложений, проявляется в первую очередь у бурых углей: бородинского, канского, берёзовского и назаровского углей.

Данные выводы подтверждаются расчётными значениями температуры шлакования и допустимой температуры газов на выходе из топочной камеры котла по условию шлакования.

Для выполнения сравнительной оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов предложено в качестве основного показателя

использовать коэффициент тепловой эффективности – ψ . Данный коэффициент является наиболее представительным и универсальным эмпирическим показателем, характеризующим режимные параметры протекания сложных тепло- и физикохимических процессов в газоходах котельного агрегата и его конструктивные особенности, численное значение которого тождественно отражает величину термического сопротивления трубной поверхности[11].

Таблица 1

Результаты экспертной оценки шлакующих свойств углей и их смесей

уголь	Показатели								
	fe	na	ca	тэ	шп	шл	т"	S	iO ₂ экв
Бородинский	,55	,23	,73	,75	,72	65	145	,84	2
Канский	,75	,28	,76	,86	,92	75	085	,69	3
Черногорский	,48	,32	,38	,64	,58	005	185	1	2
Изыхский	,33	,35	,45	,67	,70	70	150	1	3
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	,55	,27	,68	,75	,72	65	145	,88	2
Харанорский	,45	,27	,54	,63	,64	90	170	1	6
Назаровский	,71	,29	,84	,85	,74	005	140	/д*	0
Черногорский, отсев	,24	,30	,37	,55	,54	020	200	1	7
Бородинский (70%) + черногорский, отсев (30%)	,52	,26	,65	,73	,69	70	150	,98	6
Бородинский (50%) + Черногорский, отсев (50%)	,52	,27	,59	,72	,67	80	160	1	9
Бородинский (30%) + Черногорский, отсев (70%)	,52	,29	,51	,70	,67	90	160	1	2
Элегестинский	,54	,37	,53	,76	,74	60	140	1	4
Берёзовский	,64	,31	,82	,82	,81	90	115	/д*	5

* – по назаровскому и берёзовскому углю нет необходимых для расчёта fS данных по содержанию SO₃ в минеральной части

Шлакующие и загрязняющие свойства (метод УралВТИ-УПИ): R_{fe} – индекс загрязнения Fe-отложениями, R_{na} – индекс загрязнения Na-отложениями, R_{ca} – индекс загрязнения Ca-отложениями, R_{тэ} – индекс шлакования топочных экранов, R_{шп} – индекс шлакования полурадационных поверхностей, T_{шл} – температура начала шлакования, T_{т"} – температура на выходе из топки (допустимая).

Шлакующие и загрязняющие свойства (зарубежные оценки): fS – индекс шлакования по методу Альтмана (Mineral), SiO₂экв – индекс шлакования по методу "Эквивалентный

кремний"; **НШ** – нешлакующее топливо, **Ш** – шлакующее топливо, **СШ** – сильно шлакующее топливо. Ранги свойств (качественная оценка уровня свойств): **Н** – низкий, **С** – средний, **В** – высокий, **ОВ** – очень высокий.

Данные выводы подтверждаются расчётными значениями температуры шлакования и допустимой температуры газов на выходе из топочной камеры котла по условию шлакования.

Для выполнения сравнительной оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов предложено в качестве основного показателя использовать коэффициент тепловой эффективности – ψ . Данный коэффициент является наиболее представительным и универсальным эмпирическим показателем, характеризующим режимные параметры протекания сложных тепло- и физикохимических процессов в газоходах котельного агрегата и его конструктивные особенности, численное значение которого тождественно отражает величину термического сопротивления трубной поверхности [11].

Оценка коэффициента тепловой эффективности произвольной поверхности нагрева осуществляется по соотношению значений фактического коэффициента теплопередачи $K_{\text{факт}}$, кВт/(м²·К) найденному по результату экспериментальных работ из уравнения теплового баланса к аналогичному коэффициенту, рассчитанному для чистой поверхности нагрева K (без учёта коэффициента загрязнения), кВт/(м²·К)

$$\psi = \frac{K_{\text{факт}}}{K}, \quad (1)$$

Данная сравнительная оценка выполнялась с помощью специализированных программ теплового расчета котельных агрегатов [12], а в качестве исходных данных были использованы штатные режимные параметры АСУ ТП котла. Для определения дополнительных режимных показателей, проводились балансовые испытания согласно общепринятым методикам тепловых испытаний котельных агрегатов с последующей адаптацией вычислительных программ к результатам полученных экспериментальных данных [13]. Сравнительный анализ проводился при нагрузках котла близких к номинальным.

Результаты оценки тепловой эффективности поверхностей нагрева представлены в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает, что тепловая эффективность радиационных поверхностей нагрева котельных агрегатов снижается по мере повышения паропроизводительности котла, а конвективных наоборот повышается.

Установлено, что переход на сжигание смеси проектных и непроектных углей позволяет эффективно использовать непроектные топлива без ущерба тепловой эффективности поверхностей нагрева, а выбор требуемого соотношения проектных и непроектных углей позволит решить ряд технико-экономических проблем энергетического использования непроектных углей.

С целью проведения сопоставительного анализа основных тепловых характеристик работы котельных агрегатов при сжигании проектных и непроектных топлив была разработана методика предварительной оценки целесообразности проведения экспериментальных работ (балансовых испытаний). В качестве основных показателей тепловой работы котла по условию шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котла выбраны: температура газов на выходе из топки и температура газов перед конвективным пароперегревателем с последующим сопоставлением полученных расчётным путем температур с допустимыми значениями, полученными экспертным путем по методике Coral, учитывающей химический состав минеральной части угля [10, 14].

Таблица 2

Тепловая эффективность поверхностей нагрева
котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	ТК	ШПП	ППЗ,4	ПП1,2	ВЭ2	ВЭ1	ТВП
Бородинский	0,406	0,516	0,640	0,727	0,766	0,764	0,89
Канский	0,394	0,344	0,625	0,711	0,758	0,76	0,89
Назаровский	0,396	0,506	0,579	0,664	0,737	0,751	0,89
Харанорский	0,419	0,537	0,695	0,804	0,816	0,784	0,89
Элегестинский	0,405	0,506	0,697	0,807	0,819	0,786	0,89
Изыхский	0,415	0,524	0,700	0,826	0,840	0,794	0,89
Берёзовский	0,399	0,460	0,592	0,676	0,742	0,754	0,89
Черногорский	0,418	0,535	0,694	0,837	0,858	0,802	0,89
Черногорский, отсев	0,428	0,525	0,693	0,838	0,861	0,803	0,89
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	0,406	0,516	0,660	0,751	0,779	0,769	0,89
Бородинский (70%) + Черногорский, отсев (30%)	0,408	0,527	0,671	0,764	0,787	0,772	0,89
Бородинский (30%) + Черногорский, отсев (70%)	0,412	0,532	0,698	0,812	0,824	0,788	0,89
Бородинский (50%) + Черногорский, отсев (50%)	0,410	0,532	0,687	0,788	0,803	0,779	0,89

Результаты тепловых расчётов котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ в качественной и количественной интерпретации представлены в таблицах 3-5, а результаты сравнительного анализа вышеуказанных температур на рис. 1-2. Установлены следующие ограничения по котельному и вспомогательному оборудованию (см. табл. 4,5):

1. Пылесистемы прямого вдувания, оснащенные инерционными сепараторами, не обеспечивают требуемую для каменных углей тонину помола готовой пыли, что приводит к повышению потерь с механической неполноты сгорания.

2. При воздушной сушке каменных углей значительно возрастает доля первичного воздуха (свыше 50%), растет температура уходящих газов. При сушке горячим и слабоподогретым воздухом необходима существенная присадка холодного воздуха.

3. Суммарная доля топочных и уходящих газов, отбираемых на сушку топлива, существенно превышает проектную (более 25%).

4. Превышение максимально допустимой температуры газов на выходе из топки (см. рис.1), что приводит к снижению беспылаковой мощности котла.

Таблица 3

**Сравнительный анализ изменения режимных и тепловых характеристик
работы котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ**

Уголь	Низшая теплота сгорания, Q_i	Приведённая влажность, $W^п$	Приведённая зольность, $A^п$	Приведённое содержание серы, $S^п$	Выход летучих, V^{daf}	Взрываемость (группа)	Температура жидкоплавления состояния t_c	Интенсивность шлакования экранов	Интенсивность шлакования ширм Максимально-допустимая	температура газов на выходе из	Температура начала шлакования	Закрепление конвективных поверхностей нагрева	Износ
Бородинский	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Канский	△	▽	▽	△	▽	□	□	△	△	▽	△	△	▽
Назаровский	▽	△	▽	△	▽	□	△	△	△	▽	△	△	▽
Харанорский	▽	△	△	△	▽	□	▽	▽	▽	△	△	▽	△
Изыхский	△	▽	▽	□	▽	□	▽	△	△	▽	▽	▽	▽
Элегестинский	△	▽	△	△	▽	□	△	▽	▽	△	△	▽	▽
Берёзовский	△	△	▽	□	▽	□	△	△	△	▽	△	△	▽
Черногорский	△	▽	△	△	▽	□	△	▽	▽	△	△	▽	△
Черногорский, отсев	△	▽	△	△	▽	□	△	▽	▽	△	△	▽	△
Бородинский (80 %)+ Изыхский (20%)	△	▽	△	□	▽	□	▽	□	□	□	□	▽	△
Бородинский (70%)+ Черногорский, отсев (30%)	△	▽	△	□	▽	□	▽	▽	▽	△	△	▽	△
Бородинский(30%)+ Черногорский,отсев(70%)	△	▽	△	△	▽	□	▽	▽	▽	△	△	▽	△
Бородинский (50)+ черногорский, отсев (50)	△	▽	△	□	▽	□	▽	▽	▽	△	△	▽	△

= – отсутствие изменений, △ – повышение, ▽ – уменьшение показателей относительно проектного топлива.

Обсуждение

Основываясь на результатах теплогидравлических расчётов с использованием данных экспертного анализа шлакующих и загрязняющих свойств и рейтинговых оценок указанных топлив, был определен ряд мероприятий, повышающих надёжность работы котельных агрегатов при сжигании непроектных топлив и их смесей.

В частности, наименее затратным мероприятием повышения тепловой эффективности поверхностей нагрева котла является модернизация используемых средств очистки. Для углей и их смесей с рейтингами шлакования ширм и топочных экранов, относящихся к очень высоким (ОВ), необходима модернизация средств очистки топки с установкой дальнобойных аппаратов водяной обдувки (4 аппарата типа ОВД-2).

По опыту сжигания хакасских каменных углей с высокой зольностью относительно проектного топлива может потребоваться усиление пылепроводов для защиты их от абразивного износа.

При сжигании непроектных каменных углей для снижения потерь q_4 потребуется повышение уставок по температуре аэросмеси до ~200 °С.

Таблица 4

Сравнительный анализ изменения режимных и тепловых характеристик
работы котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	Температура уходящих газов при Дном	Номинальный перегрев пара при $D > 0,7$ Дном	КПД котла при Дном	Расход топлива при Дном	Температура газов на выходе из топки при Дном	Превышение температуры газов на выходе из топки	Температура газов перед КПП при Дном	Превышение начала шлакования	Впрыск (пароохладитель)	Расход уходящих газов при Дном	Ограничения по котельному и вспомогательному оборудованию*
Бородинский	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
Канский	Δ	□	Δ	▽	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	▽	
Назаровский	▽	□	Δ	▽	Δ	Δ	Δ	▽	Δ	▽	1,2
Харанорский	▽	□	Δ	▽	Δ	▽	Δ	▽	Δ	▽	1,2
Изыхский	▽	□	Δ	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	1,2,4
Элегестинский	▽	□	Δ	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	1,2
Берёзовский	▽	□	▽	Δ	▽	▽	▽	▽	▽	Δ	3
Черногорский	▽	□	Δ	▽	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	▽	1,2
Черногорский, отсев	Δ	□	▽	Δ	Δ	▽	Δ	▽	Δ	Δ	3
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	Δ	□	▽	▽	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	
Бородинский (70%)+ Черногорский, отсев (30%)	▽	□	Δ	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	1,2,4
Бородинский(30%)+ Черногорский,отсев(70%)	▽	□	Δ	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	1,2,4
Бородинский (50%)+ Черногорский, отсев (50%)	▽	□	Δ	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	

= – отсутствие изменений, Δ – повышение, ▽ – уменьшение показателей относительно проектного топлива.

Оценка надёжности работы пароперегревательных поверхностей нагрева котла при сжигании различных марок углей выполняется на основе определения температуры стенки металла, вычисляемой по результату теплового расчёта котла [15]. Сравнительный анализ осуществляется посредством определения относительного отклонения температуры стенки металла при сжигании непроектных углей от температуры металла, полученной при сжигании проектного топлива. В основу методики оценки температуры стенки положен нормативный метод расчёта [12], основанный на расчёте прочности металла труб по средней по толщине стенки металла температуре в наиболее теплонпряженном месте.

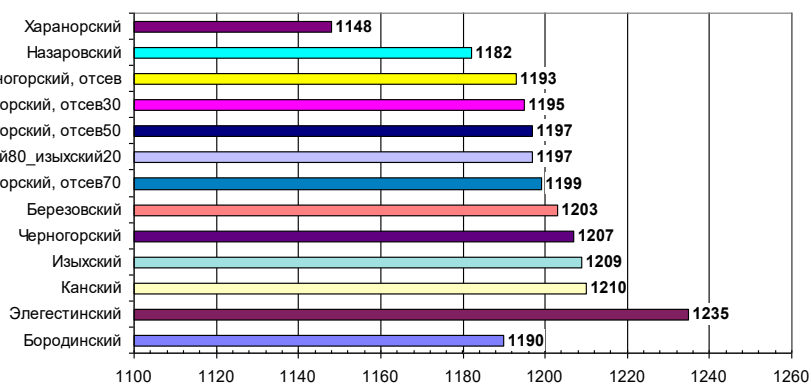
Это может быть либо место с более высокой локальной тепловой нагрузкой (например, радиационные поверхности, обращенные в топочную камеру), либо место с наиболее высокой температурой рабочей среды – пара (выходные змеевики перегревателя).

Таблица 5

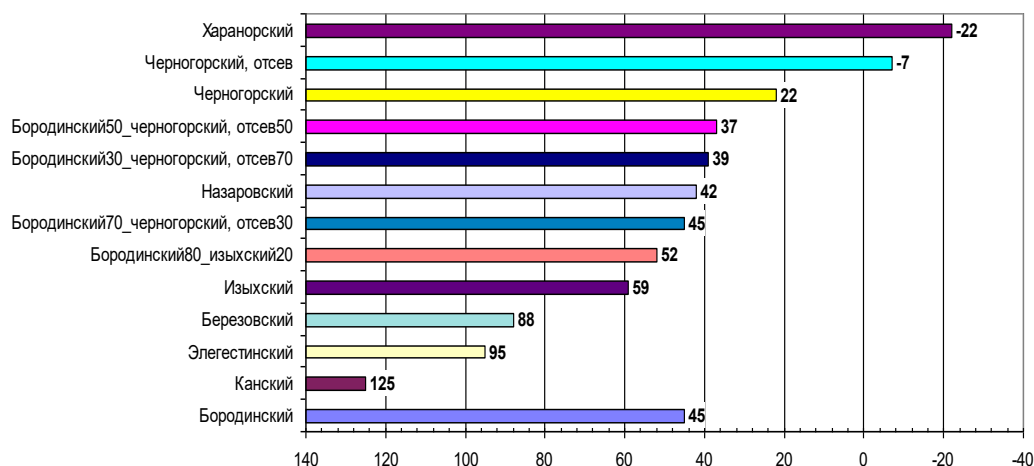
Анализ изменения численных значений режимных и тепловых характеристик работы котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	Температура уходящих газов при Дном	Номинальный перегрев пара при $D > 0,7 D_{ном}$	КПД котла при Д ном	Расход топлива при Дном	Максимальное тепловое напряжение сечения топочной камеры, q_F	Температура газов на выходе из топки при Дном	Температура газов перед КПП при Дном	Температура за фестоной частью	Ограничения по котельному и вспомогательному оборудованию
Бородинский	165	-	91,5	75,2	3,50	1190	986	920	
Канский	165	-	91,8	70,0	3,50	1210	1032	959	4
Назаровский	171	+	90,8	85,1	3,50	1182	989	930	3
Харанорский	167	+	90,9	94,3	3,50	1148	950	882	3
Элегестинский	152	-	93,1	45,4	3,50	1235	1007	932	1,4
Изыхский	152	-	93,1	52,3	3,50	1209	973	900	1,4
Берёзовский	157	-	91,4	72,5	3,50	1203	1011	949	4
Черногорский	152	-	93,0	51,8	3,50	1207	977	905	1,4
Черногорский, отсев	152	-	92,9	55,0	3,50	1193	964	893	1,4
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	162	-	91,9	69,1	3,50	1197	985	917	4
Бородинский (70%)+ Черногорский, отсев (30%)	161	-	92,0	67,7	3,50	1195	980	911	4
Бородинский (30%)+ Черногорский, отсев (70%)	156	-	92,6	59,8	3,50	1199	972	900	4
Бородинский (50%)+ Черногорский, отсев (50%)	158	-	92,3	63,5	3,50	1197	976	905	4

Это может быть либо место с более высокой локальной тепловой нагрузкой (например, радиационные поверхности, обращенные в топочную камеру), либо место с наиболее высокой температурой рабочей среды – пара (выходные змеевики перегревателя).



а)



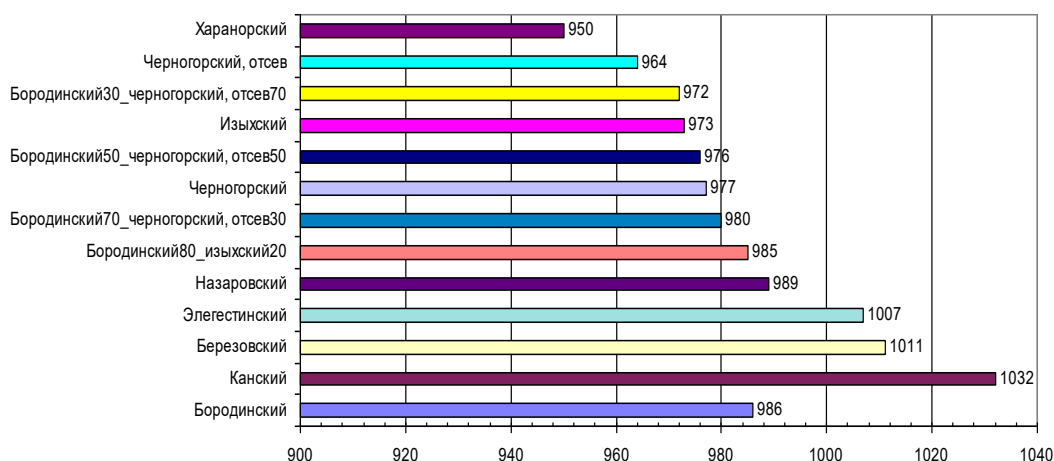
б)

Рис. 1. Температура газов на выходе из топки котла при номинальной нагрузке (а), превышение максимальной температуры на выходе из топки котла при номинальной нагрузке (б).

Для установления максимальной температуры металла используются данные теплового расчёта поверхности нагрева и её конструктивное исполнение. Для пароперегревательных поверхностей нагрева в зоне высоких температур газов максимальная температура стенки трубы определяется по следующей формуле [16]:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{п}}^{\text{макс}} + \mu \beta q_{\text{макс}} \left(\frac{\delta}{\lambda_{\text{м}}} \frac{1}{1 + \beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (2)$$

В формулу (2) входят следующие величины, требующие специального определения: $t_{\text{п}}^{\text{макс}}$ – максимальная расчётная температура пара с учётом неравномерности тепловосприятия по ширине газохода, °C; $q_{\text{макс}}$ – максимальное тепловосприятие рабочей среды в расчётном участке трубы, кВт/м²; $\beta = d/d_{\text{вн}}$ – конструктивный коэффициент, характеризующий отношение наружного диаметра трубы к внутреннему; μ – коэффициент растечки тепла по периметру трубы в силу неравномерности её обогрева; δ – толщина стенки трубы, мм; $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·K); α_2 – локальный коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочей среде (пару, воде), кВт/(м²·K).



а)

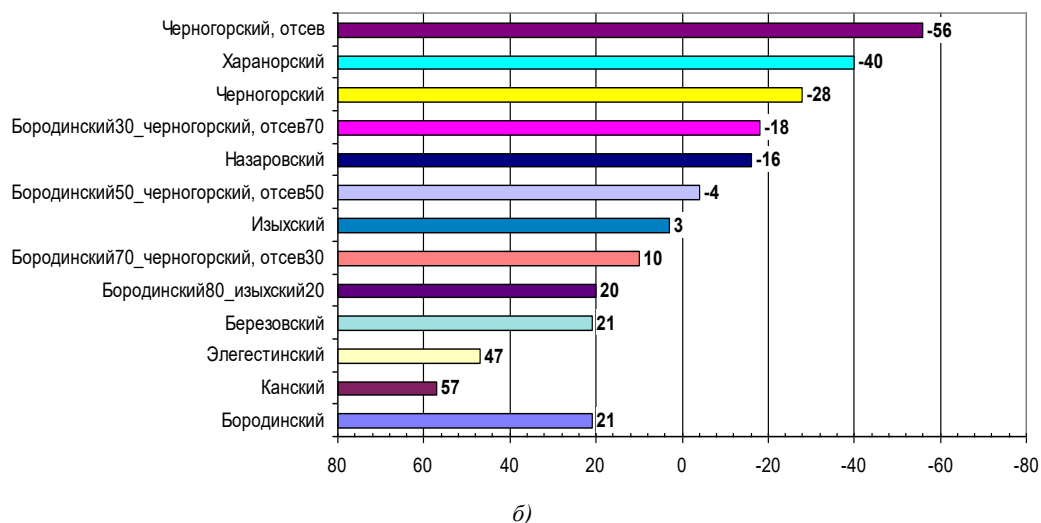


Рис. 2. Температура газов перед конвективным пароперегревателем котла при номинальной нагрузке (а), превышение температуры газов на входе КПП над $T_{нш}$ котла при номинальной нагрузке (б)

Результаты сравнительного анализа значений температуры стенки выходного пакета пароперегревателя при сжигании непроектных углей представлены на рисунке 3. Анализ полученных данных по определению температуры стенки металла выходного пакета пароперегревателя, как наиболее нагруженного элемента тепловой схемы котельного агрегата, показал, что на котле БКЗ-420 ТШУ Абаканской ТЭЦ существенное превышение температуры металла получено только при сжигании таких непроектных углей, как канский и харанорский (на 0,2–0,3%), что как следствие может привести к изменению характеристик прочности, используемых для изготовления поверхности нагрева марок стали [17, 18].

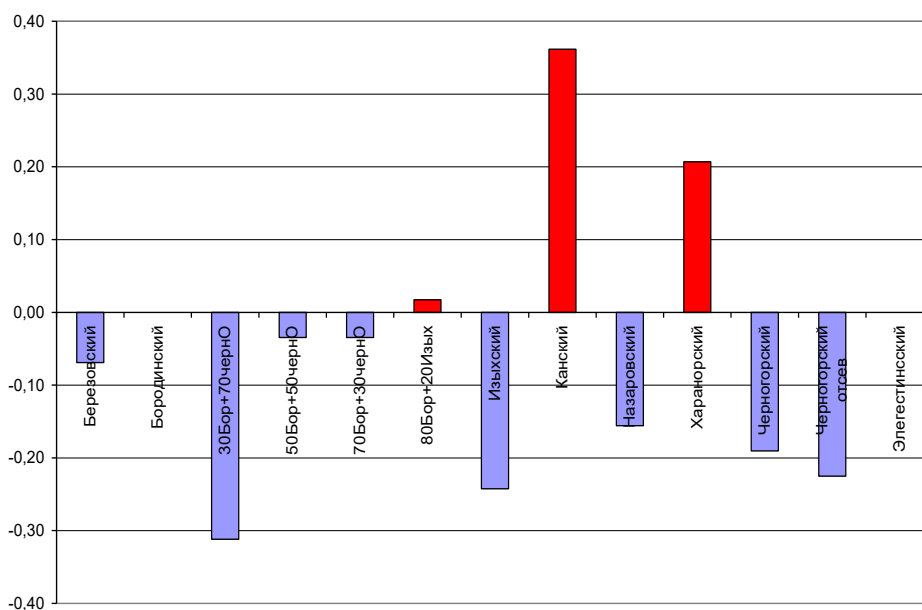


Рис. 3. Относительное изменение температуры стенки выходного пакета конвективного пароперегревателя котлоагрегата

Заключение

Экспериментально-расчетные исследования процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата БКЗ-420-140 Абаканской ТЭЦ при сжигании непроектных углей показали:

1. Использование коэффициентов рейтинга топлива и нормируемых параметров котельного агрегата являются необходимой и достаточно представительной информацией

для прогнозирования шлакующих и загрязняющих свойств различных углей в условиях реальных топливоиспользующих устройств;

2. Анализ шлакующих свойств рассматриваемых углей показал, что наивысшая склонность к образованию наиболее прочных железистых отложений, образующихся в основном в топочной камере котла относятся канский и назаровский угли. Из числа смесей, наибольшую склонность к образованию железистых отложений проявляет в широком диапазоне смесь бурого бородинского и каменного черноморского углей. С точки зрения образования натриевых отложений все рассматриваемые угли и их смеси относятся к классу нешлакующих топлив. Максимальные значения данный индекс принимает для каменных углей: изыхского и элгестинского. Склонность к образованию кальциевых отложений, косвенно характеризующих прочность отложений, проявляется в первую очередь у бурых углей: бородинского, канского, берёзовского и назаровского месторождений.

3. Анализ результатов оценки тепловой эффективности поверхностей нагрева котельного агрегата показывает, что тепловая эффективность радиационных поверхностей нагрева котельных агрегатов снижается по мере повышения паропроизводительности котла, а конвективных наоборот повышается. Переход на сжигание смеси проектных и непроектных углей позволяет эффективно использовать непроектные топлива без ущерба тепловой эффективности поверхностей нагрева, а выбор требуемого соотношения проектных и непроектных углей позволит решить ряд технико-экономических задач энергетического использования непроектных углей.

4. По результатам теплогидравлических расчетов котельного агрегата с использованием данных экспертного анализа шлакующих и загрязняющих свойств минеральной части топлив получено, что наименее затратным мероприятием по использованию непроектных углей на котле БКЗ-420-140 ТШУ Абаканской ТЭЦ является модернизация используемых средств очистки (обдувочных аппаратов) и научно-обоснованный выбор оптимального соотношения смеси проектного и непроектного топлива по условию минимальной интенсивности процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева.

Литература

1. Кожуховский И.С., Алешинский Р.Е., Говсиевич Е.Р. Проблемы и перспективы угольной генерации России. Уголь. 2016. № 2. с. 4-15.
2. Говсиевич Е.Р., Алешинский Р.Е., Векслер Ф.М., и др. Техничко-экономические особенности использования непроектных углей на тепловых электростанциях. Промышленная энергетика. 2008. С. 15-20.
3. Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго». Вестник иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. №3. С. 639-648.
4. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018;20(11-12):27-33.
5. Алехнович А.Н. Контроль и прогнозирование шлакующих свойств углей и шлакования пылеугольных котлов. Библиотечка электротехника. 2018. № 4. с. 1-72
6. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Ф., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. М., Энергия, 1977.
7. Майданник М.Н., Тугов А.Н., Верещетин В.А. Оценка технического состояния котельных установок по показателям качества. Теплоэнергетик. 2020, № 4, с. 33-40.
8. Tugov A.N., Maydannik M.N. Heat-recovery steam generators at thermal power plants of Russia. Power Technology and Engineering. 2019. T.52, №5, p. 555-558.
9. Алехнович А.Н., Артемьева Н.В. Влияние зольности на шлакующие свойства углей и шлакование пылеугольных котлов. Электрические станции. 2017. № 3. с. 8-15.

10. Алехнович А.Н. Экспертная оценка и прогнозирование шлакующих свойств углей. Электрические станции. 2015. №8. С. 7-17
11. Бойко Е.А., Жадовец Е.М., Янов С.Р. Анализ тепловой эффективности полурadiационных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов. Электрические станции. 2010. №10. с. 41-46
12. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание 3-е, перераб. и дополненное. СПб: НПО ЦКТИ. 1998. 256 с.
13. Тугов А.Н., Рябов Г.А., Штегман А.В., Рыжий И.А., Литун Д.С. Опыт ВТИ по использованию в энергетике проблемных топлив. Теплоэнергетика. 2016, № 7, с. 3-11.
14. Zhang Y., Li Q., Zhou H. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces. Elsevier. 2016. 350 p.
15. Tong H., Zhang X., Tong Z., et al. Online Ash Fouling Prediction for Boiler Heating Surfaces based on Wavelet Analysis and Support Vector Regression. Energies. 2020. V.13(1). № 59. p. 64-75.
16. Zhang S., Shen G., An L., Li G. Ashfouling monitoring based on acoustic pyrometry in boiler furnaces. Appl. Therm. Eng. 2016. 84. p. 74–81
17. Trojan M., Taler D. Thermal simulation of super heaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. Fuel. 2015. V.150. pp. 75–87
18. Menn N., Chudnovskiy B. New technology for monitoring fouling deposition in coal fired boilers. VGB Powertech., 2016. №6. p. 65-70.

Авторы публикации

Бойко Евгений Анатольевич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Сибирского федерального университета (СФУ).

Загородний Игорь Владимирович – аспирант, ведущий инженер ОППР АО «Красноярская ТЭЦ-1».

References

1. Kozhukhovskii IS, Aleshinskii RE, Govsievich E. R. *Problemy i perspektivy ugol'noi generatsii Rossii*. Ugol'. 2016;2:4-15.
2. Govsievich ER, Aleshinskii RE, Veksler FM. Brzhezyanskaya N.V. Tekhniko-ekonomicheskie osobennosti ispol'zovaniya neproektnykh uglei na teplovykh elektrostantsiyakh. *Promyshlennaya energetika*, 2008, s. 15-20.
3. Koval' TV, Kudryashov AN. Otsenka shlakuyushchikh i zagryaznyayushchikh svoistv uglei, szhigaemykh na teplovykh elektrostantsiyakh PAO «Irkutskenergo». *Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;24(3):639-648.
4. Kuzmin VA, Zagrai IA, Desiatkov IA. Determination of peat ash fusibility of Kirov region deposits. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):27-33.
5. Alekhovich A.N. Kontrol' i prognozirovaniye shlakuyushchikh svoistv uglei i shlakovaniya pyleugol'nykh kotlov. *Bibliotekha elektrotekhnika*. 2018;4:1-72.
6. Trembovlya VI, Finger EF, Avdeeva AA. *Teplotekhnicheskie i spyvaniya kotel'nykh ustanovok*. M., Energiya, 1977.
7. Maidannik MN, Tugov AN, Vereshchetin VA. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya kotel'nykh ustanovok po pokazatelyam kachestva. *Teploenergetik*. 2020;4:33-40.
8. Tugov AN, Maydannik MN. Heat-recovery steam generators at thermal power plants of Russia. *Power Technology and Engineering*. 2019;52(5):555-558.
9. Alekhovich AN, Artem'eva NV. Vliyaniye zol'nosti na shlakuyushchie svoistva uglei i shlakovaniye pyleugol'nykh kotlov. *Elektricheskie stantsii*. 2017;3:8-15.
10. Alekhovich AN. Ekspertnaya otsenka i prognozirovaniye shlakuyushchikh svoistv uglei. *Elektricheskie stantsii*. 2015;8:7-17.

11. Boiko EA, Zhadovets EM, Yanov SR. Analiz teplovoi effektivnosti poluradiatsionnykh i konvektivnykh poverkhnostei nagreva pyleugol'nykh parovykh kotlov. *Elektricheskie stantsii*. 2010;10:41-46
12. Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod). Izdanie 3-e, pererab.i dopolnennoe. SPb: NPO TsKTI. 1998. 256 s.
13. Tugov AN, Ryabov GA, Shtegman AV, et al. Opyt VTI po ispol'zovaniyu v energetike problemnykh topliv. *Teploenergetika*. 2016;7:3-11.
14. Zhang Y, Li Q, Zhou H. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces. *Elsevier*. 2016. 350 p.
15. Tong H, Zhang X, Tong Z, et al. Online Ash Fouling Prediction for Boiler Heating Surfaces based on Wavelet Analysis and Support Vector Regression. *Energies*. 2020,13(1):59:64-75.
16. Zhang S, Shen G, An L., et al. Ash fouling monitoring based on acoustic pyrometry in boiler furnaces. *Appl. Therm. Eng.* 2016;84:74-81
17. Trojan M, Taler D. Thermal simulation of superheaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. *Fuel*. 2015;150:75–87
18. Menn N, Chudnovskiy B. New technology for monitoring fouling deposition in coal fired boilers. *VGB Powertech.*, 2016,6:65-70.

Authors of the publication

Evgenii A. Boiko – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Igor V. Zagorodnii – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Получено

18 ноября 2020г.

Отредактировано

9 декабря 2020г.

Принято

11 декабря 2020г.



ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

П.В. Ротов¹, А.А. Сивухин², М.А. Ротова¹, Р.А. Гафуров¹, А.В. Горшков³

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

²УМУП «Городской теплосервис», Ульяновск, Россия

³Филиал «Ульяновский» ПАО «Т Плюс», Ульяновск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6228-6401>, p.rotov@rambler.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Выполнить анализ соответствия фактического расхода тепловой энергии на подогрев холодной воды для коммунальной услуги горячего водоснабжения утвержденному нормативу. Сравнить различные способы регулирования расхода в циркуляционных трубопроводах систем горячего водоснабжения. Определить способы повышения экономичности работы систем горячего водоснабжения. МЕТОДЫ. Методом пассивного инженерного эксперимента выполнено исследование режимов работы систем горячего водоснабжения нескольких групп домов, в которых реализованы различные способы регулирования расхода воды в системах горячего водоснабжения. Сбор данных осуществлялся при помощи онлайн-системы контроля и коммерческого учета энергоресурсов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выполнено обследование действующих систем горячего водоснабжения в жилых домах г. Ульяновска при различных способах регулирования расхода в циркуляционных трубопроводах. Исследованы особенности статического и динамического регулирования нагрузки систем горячего водоснабжения. Выполнен анализ влияния способов регулирования тепловой нагрузки систем горячего водоснабжения на их фактическое теплопотребление. Оценена возможность приведения фактического режима работы систем горячего водоснабжения к нормативному значению, на основании которого производится расчет потребления. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Известные способы регулирования нагрузки в системах горячего водоснабжения и реальные условия их эксплуатации не позволяют достичь уровня теплопотребления, соответствующего установленным нормативам. Сделаны выводы о необходимости пересмотра нормируемых показателей качества горячей воды и корректировки методики расчета потребления в системах горячего водоснабжения.

Ключевые слова: теплофикационные системы, системы горячего водоснабжения, энергосбережение, регулирование тепловой нагрузки, повышение энергетической эффективности

Для цитирования: Ротов П.В., Сивухин А.А., Ротова М.А., Гафуров Р.А., Горшков А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 117-129. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-117-129.

ON THE EFFICIENCY OF THE CONTROL OF THE CIRCULATION OF HOT WATER

PV. Rotov, AA. Sivukhin, MA Rotova, RA. Gafurov, AV. Gorshkov

Abstract: PURPOSE. Perform analysis of the actual heat energy consumption for cold water heating for the hot water utility to the approved standard. Compare different methods of flow control in circulation pipelines of hot water supply systems. Identify ways to improve the efficiency of hot water systems. METHODS. The passive engineering experiment was used to study the operating modes of hot water supply systems of several groups of houses, in which various methods of regulating water consumption in hot water supply systems are implemented. Data collection was carried out using the online system of control and commercial accounting of energy resources. RESULTS. Existing hot water supply systems in residential buildings of Ulyanovsk were inspected under various methods of flow control in circulation pipelines. Features of static and dynamic load control of hot water supply systems were investigated. Analysis of influence of methods of control of thermal load of hot water supply systems on their actual heat consumption

was performed. The possibility of bringing the actual operation mode of hot water supply systems to the standard value, on the basis of which consumption is calculated, is estimated. **CONCLUSION.** Known methods of load control in hot water supply systems and their actual operating conditions do not allow to reach the level of heat consumption that meets the established standards. Conclusions were drawn on the need to revise the regulated indicators of hot water quality and to adjust the method of calculating consumption in hot water supply systems.

Key words: heating systems, hot water supply systems, energy saving, heat load control, energy efficiency improvement.

For citation: Rotov PV, Sivukhin AA, Rotova MA, Gafurov RA, Gorshkov AV. On the efficiency of the control of the circulation of hot water. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):117-129. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-117-129.

Введение и литературный обзор

Как известно, одним из показателей энергетической эффективности теплофикационных систем является температура обратной сетевой воды. В централизованных системах теплоснабжения значение температуры воды, возвращаемой на теплоисточник, определяется точностью и качеством регулирования нагрузки систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения [1, 2].

Обследование действующих централизованных систем теплоснабжения показывает, что существует ежегодная тенденция снижения потребления теплоты, обусловленная внедрением энергосберегающих технологий и коммерческого учета тепловой энергии [3–6].

Особенностью работы отечественных систем теплопотребления является нормирование температуры воды в обратном трубопроводе систем отопления и отсутствие нормирования температуры циркуляционной воды в системах горячего водоснабжения. В таких условиях существенно возрастает влияние режима работы систем горячего водоснабжения на температуру обратной сетевой воды [7].

В табл. 1 приведены сведения о режимах работы систем теплопотребления ряда жилых домов в г. Ульяновск. Как следует из приведенных данных, существенный негативный вклад в превышение температуры обратной сетевой воды вносит циркуляция горячей воды. При этом системы теплопотребления домов, указанных в табл. 1, необходимым образом отрегулированы и работают в расчетном режиме.

Следует отметить, что такое соотношение температуры в обратных трубопроводах различных систем теплопотребления характерно для большинства потребителей системы теплоснабжения.

В настоящее время расчет потребления в системах горячего водоснабжения осуществляется с использованием норматива расхода тепловой энергии, используемой на подогрев холодной воды, величина которого варьируется в регионах России от 0,057 до 0,069 Гкал/м³ [8,9]. Применение такого способа расчета подразумевает, что плата за коммунальную услугу горячего водоснабжения определяется индивидуально для каждого потребителя в зависимости от режима потребления горячей воды. Однако с момента введения этого норматива среди специалистов не утихают споры о правильности такого способа определения платы за коммунальную услугу горячего водоснабжения (ГВС).

Таблица 1

Адрес	Температура воды, °С		
	в обратном трубопроводе теплосети	в обратном трубопроводе отопления	в циркуляционном трубопроводе ГВС
пр. Сурова, 25	47	43	54
пр. Сурова, 37	47	42	53
пр. Сурова, 41	51	44	55
пр. Сурова, 35	49	44	54
пр. Сурова, 33	46	43	52
б. Фестивальный, 10	44	42	49
б. Фестивальный, 6	46	43	50
б. Фестивальный, 3	47	42	52
пр. Ульяновский, 7 (2 ввод)	43	41	48

пр. Ульяновский, 7 (1 ввод)	47	42	53
пр. Ульяновский, 5 (2 ввод)	48	44	51
пр. Ульяновский, 5 (1 ввод)	52	45	55
пр. Ульяновский, 3 (2 ввод)	47	43	51
пр. Ульяновский, 3 (1 ввод)	41	39	48
пр. Туполева, 14	46,5	43	50
пр. Туполева, 10	46	43	52
пр. Ленинского Комсомола, 49	46	42	53
пр. Ленинского Комсомола, 53	43	40	50
ул. 40 летия Победы, 24	56	45	59
ул. 40 летия Победы, 26	42	40	49
ул. 40 летия Победы, 22	47	44	53

Норматив – это расчетная величина, которая определяется с целым рядом допущений, не учитывающих реальные режимы потребления в системах горячего водоснабжения [8, 9]. Так, температура горячей и холодной воды принимаются постоянными. Циркуляционный расход в системе ГВС учитывается при помощи добавочного коэффициента, максимальное значение которого, как показывают исследования, не учитывает фактическое значение потерь [9–11]. В результате, введенные допущения существенно влияют на точность и полноту учета фактического расхода тепловой энергии в системах горячего водоснабжения.

Как показывает обследование и анализ режимов работы систем горячего водоснабжения, норматив расхода тепловой энергии на подогрев повсеместно занижен. При поддержании циркуляции и температуры горячей воды в пределах от 60°C до 75°C, фактическое удельное теплопотребление на ГВС может превышать значение 0,1 Гкал/м³ (см. табл. 2). В малозаселённых домах, кварталах, а также там, где часть жителей перешли на самостоятельный газовый или электрический нагрев воды, эта величина ещё выше. Несоответствие нормативных значений и фактического потребления тепловой энергии в системах горячего водоснабжения приводит к значительным годовым финансовым потерям энергоснабжающих предприятий, которые, по оценкам экспертов, могут достигать 100 млн. руб. для города с населением 500-700 тыс. чел.

Материалы и методы

Для анализа соответствия фактического расхода тепловой энергии на подогрев холодной воды для предоставления коммунальной услуги по горячему водоснабжению утвержденному нормативу (нормативу на подогрев), влияющего на распределение потерь в общей системе теплоснабжения и горячего водоснабжения, в г. Ульяновск проведено обследование ряда внутридомовых систем горячего водоснабжения. Проведено сравнение режимов работы систем ГВС при ограничении циркуляционного расхода путем установки дроссельных диафрагм постоянного сечения и выдерживания заданных значений температуры воды в циркуляционных линиях за счет установки термостатических клапанов.

Таблица 2

Параметры ГВС у потребителей до проведения технических мероприятий

Адрес	Расход тепловой энергии на подогрев, Гкал/м³		Температура воды, °С		Расход воды, т/ч	
	расчетный	фактически	в подающем трубопроводе ГВС Т ₃	в циркуляционном трубопроводе ГВС Т ₄	в подающем трубопроводе ГВС, М ₃	в циркуляционном трубопроводе ГВС, М ₄
ЦТП «Локомотивное депо»						
ул. Кирова, 50	0,067	0,075	61,97	58,37	3,82	3,46
ул. Кирова, 52	0,067	0,068	61,08	57,07	3,87	3,4
ул. Железнодорожная, 45	0,067	0,125	61,23	52,92	2,15	1,95

ЦТП «УЗТС 1а»						
ул. Ефремова, 37	0,067	0,128	66,33	51,38	2,78	2,23
ул. Ефремова, 46	0,067	0,099	64,01	52,24	1,85	1,37
ул. Станко-строителей, 6	0,067	0,121	65,4	54,96	5,88	4,91
ул. Станко-строителей, 8	0,067	0,148	63,84	54,16	3,45	3,09
ул. Станко-строителей, 10	0,067	0,122	65,58	52,26	2,28	1,84
ул. Станко-строителей, 12	0,067	0,151	65,24	53,37	3,12	2,74
ул. Станко-строителей, 14	0,067	0,147	67,61	55,02	2,9	2,5
ул. Станко-строителей, 22	0,067	0,112	62,37	51,87	1,69	1,4
ул. Станко-строителей, 16	0,062	0,071	67,56	59,7	1,16	0,38
ул. Станко-строителей, 18	0,062	0,077	66,56	45,55	1,13	0,36
ул. Станко-строителей, 20	0,062	0,072	66,92	57,72	2,6	1,35

Мероприятия проводились в период с 20.07.2018 г. по 17.10.2018 г. в жилых домах, присоединенных к двум центральным тепловым пунктам со следующими характеристиками:

- ЦТП «Локомотивное депо»: 2-х трубная система теплоснабжения, присоединено 3 жилых дома, системы ГВС циркуляционные, стояки с полотенцесушителями, подключенная нагрузка ГВС 0,82 Гкал/час;
- ЦТП «УЗТС 1а»: 4-х и 2-х трубная система теплоснабжения, присоединено 11 жилых домов, в 8 домах системы ГВС циркуляционные, стояки с полотенцесушителями, в 3-х домах системы ГВС без циркуляции, подключенная нагрузка ГВС 5,68 Гкал/час.

Выбор объектов обусловлен наличием у всех потребителей приборов учета тепловой энергии и теплоносителя.

Сбор информации, обследование и анализ работы потребителей, подключенных к ЦТП, проводились в период с 20.07.2018 г. по 07.08.2018 г. Было зафиксировано текущее состояние систем ГВС, выполнены мероприятия по оптимизации режима их работы, проверено наличие и соответствие расчету установленных дроссельных диафрагм в циркуляционных линиях ГВС.

Средние значения параметров работы системы ГВС от рассматриваемых ЦТП до проведения технических мероприятий приведены в табл. 2. Как следует из табл. 2 фактическое потребление в системах ГВС превышает расчетные значения более чем в два раза.

Результаты и обсуждения

В целях приведения фактического удельного теплопотребления к расчетному значению в период с 12.09.2018 г. по 18.09.2018 г. выполнено уменьшение диаметров дроссельных диафрагм, установленных на циркуляционных линиях ГВС у потребителей тепловой энергии от ЦТП «Локомотивное депо». После корректировки режимов работы и снижения циркуляционного расхода среднее фактическое значение расхода тепловой энергии на подогрев составило 0,058 Гкал/м³, но при этом зафиксировано нарушение качества ГВС – температура теплоносителя на вводах в дома составляла менее 55°C. Очевидно, что ограничение циркуляционного расхода дроссельными диафрагмами не позволяет обеспечить потребление в системах ГВС в соответствии с нормативами.

Таблица 3

Параметры ГВС у потребителей после установки термостатических клапанов

Адрес	Расход тепловой энергии на подогрев, Гкал/м ³		Температура воды, °С		Расход воды, т/ч	
	расчетный	фактически	в подающем трубопроводе ГВС, Т ₃	в циркуляционном трубопроводе ГВС, Т ₄	в подающем трубопроводе ГВС, М ₃	в циркуляционном трубопроводе ГВС, М ₄
ЦТП «Локомотивное депо»						
ул. Кирова, 50	0,067	0,076	60,83	57,33	2,66	2,35
ул. Кирова, 52	0,067	0,074	60,7	52,37	1,88	1,4
ул. Железнодорожная, 45	0,067	0,108	61,05	52,07	2,06	1,8
ЦТП «УЗТС 1а»						
ул. Ефремова, 37	0,067	0,105	63,52	50,33	3,65	2,93
ул. Ефремова, 46	0,067	0,077	62,29	52,44	2,27	1,65
ул. Станкостроителей, 6	0,067	0,087	62,65	49,58	4,98	3,65
ул. Станкостроителей, 8	0,067	0,105	60,45	51,78	3,84	3,33
ул. Станкостроителей, 10	0,067	0,094	62,08	52,55	3,52	2,9
ул. Станкостроителей, 12	0,067	0,108	61,68	50,53	3,4	2,85
ул. Станкостроителей, 14	0,067	0,119	63,7	51,51	3,28	2,77
ул. Станкостроителей, 22	0,067	0,101	61,2	52,59	2,69	2,31
ул. Станкостроителей, 16	0,062	0,056	65,46	61,98	2,27	1,23
ул. Станкостроителей, 18	0,062	0,065	65,05	57,11	2,59	1,61
ул. Станкостроителей, 20	0,062	0,067	65,22	59,46	4,52	3,18

Для увеличения диапазона регулирования вместо дроссельных диафрагм на циркуляционных линиях ГВС были установлены термостатические клапаны повышенного сопротивления. После установки термостатических клапанов на всех домах снижены фактические расходы горячей воды. В жилых домах № 50 и № 52 по ул. Кирова не удалось уменьшить удельное теплоснабжение в системах ГВС. В доме № 45 по ул. Железнодорожная удалось на 13% уменьшить фактическое значение коэффициента на подогрев, но не удалось привести его в соответствие к нормативным значениям без потери качества ГВС из-за увеличенных поверхностей нагрева полотенцесушителей.

Средние значения параметров системы ГВС в период с 08.10.2018г. по 10.10.2018г. после установки термостатических клапанов приведены в табл. 3.

После установки термостатических клапанов во всех домах ЦТП «УЗТС 1а» снижены фактические расходы горячей воды и удельные расходы тепловой энергии на подогрев. Приблизить фактическое теплоснабжения к нормативным значениям удалось только на доме по ул. Станкостроителей, 16. Средние значения параметров системы ГВС в период с 04.10.2018г. по 17.10.2018г. после установки термостатических клапанов приведены в табл. 3.

Динамика изменения значений удельного теплопотребления до и после проведения технических мероприятий на жилых домах, присоединенных к одному из ЦТП, представлена на рис. 1.

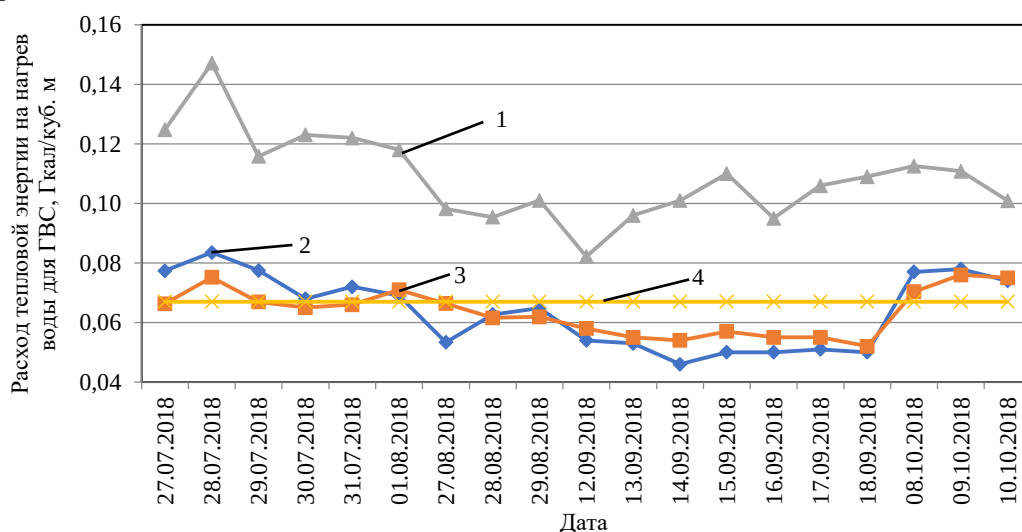


Рис. 1. Динамика изменения удельного теплопотребления в системах ГВС от ЦТП «Локомотивное депо»: 1 – ул. Железнодорожная, 45; 2 – ул. Кирова, 50; 3 – ул. Кирова, 52; 4 – расчетное значение норматива расхода тепловой энергии на подогрев воды для ГВС.

По итогам проведенных технических мероприятий в жилых домах получены следующие результаты:

1. До проведения вышеуказанных технических мероприятий фактическое потребление в системах горячего водоснабжения существенно превышало (более чем в два раза) утвержденный норматив расхода тепловой энергии, используемой на подогрев холодной воды для услуги ГВС. Причиной несоответствия являются конструктивные особенности систем горячего водоснабжения, при которых тепловая энергия из внутренней системы ГВС, независимо от времени суток и температуры наружного воздуха, используется на отопление ванных комнат.

2. Значительное влияние на удельный расход тепловой энергии оказывает режим потребления горячей воды. В часы максимального водоразбора в циркуляционных системах удельное значение расхода тепловой энергии снижается до $0,054 \text{ Гкал/м}^3$, в часы минимального водоразбора (ночное время) поднимается до $0,14\text{--}0,20 \text{ Гкал/м}^3$. В системах ГВС без циркуляции влияния количества слитого теплоносителя на фактический удельный расход тепловой энергии не такое существенное, как в циркуляционных системах. В часы максимального и минимального водоразбора значение коэффициента на подогрев колеблется в пределах от $0,053$ до $0,081 \text{ Гкал/м}^3$. Очевидно, что большего эффекта возможно добиться, применяя динамические методы регулирования, учитывающие неравномерность режима работы систем горячего водоснабжения [10–12].

3. В жилом доме № 16 по ул. Станкостроителей, не оборудованном полотенцесушителями, после установки термостатических клапанов удалось привести фактический удельный расход тепловой энергии к утвержденным нормативным значениям $0,062 \text{ Гкал/м}^3$, не допуская снижения качества горячего водоснабжения у конечного потребителя.

4. Примененные технические мероприятия по ограничению циркуляционного расхода или поддержанию заданного значения температуры циркуляционной воды не позволяют в полном объеме привести фактическое удельное теплопотребление к нормативным значениям без нарушения параметров качества. Можно предположить, что при понижении нижней границы разрешенного диапазона регулирования температуры горячей воды, например, до 55°C , эффективность таких технических мероприятий будет более высокой и не повлияет на санитарную надежность систем горячего водоснабжения даже без применения корректирующих мероприятий.

Таким образом, только ограничительными мероприятиями невозможно обеспечить соответствие фактического режима работы систем ГВС утвержденным нормативным значениям. Одним из путей решения этой проблем может стать динамическое регулирование нагрузки ГВС в зависимости от режима потребления. Технически такая задача решается установкой регулирующего оборудования на циркуляционном

трубопроводе системы ГВС. Настройка оборудования осуществляется таким образом, что в период максимального водоразбора циркуляционный расход снижается, при этом компенсация тепловых потерь в системе горячего водоснабжения происходит путем слива воды. В период минимального водоразбора компенсация потерь в системе горячего водоснабжения осуществляется путем увеличения циркуляционного расхода воды.

В 2019–2020 гг. в системе теплоснабжения Ульяновска установлено 46 узлов регулирования в 28 домах со следующими техническими характеристиками основного оборудования: регулирующий клапан – комбинированный клапан *TA-Modulator* с электроприводом *TA-Slider 160*; накладной датчик температуры воды ОВЕН ДТС3225-PT1000. В2 с чувствительным элементом Pt1000; контроллер ОВЕН-ПР200 со свободно-программируемой логикой.

Первоначально узлы регулирования были настроены для поддержания температуры в обратном трубопроводе в пределах – 50–52°C круглосуточно. Снижение температуры на 2–3°C не дало ощутимого эффекта. Поэтому была выполнена частичная перенастройка узлов регулирования в соответствии с фактическим режимом потребления ГВС по графику (табл. 4). При этом расчетное среднесуточное значение температуры воды в циркуляционном трубопроводе составило 44°C. После применения температурного графика, указанного в табл. 4, существенно изменился режим работы систем горячего водоснабжения. Сравнительный анализ режима работы в характерные сутки до регулирования и после установки оборудования приведен на рис. 2–5.

Таблица 4

Температурный график регулирования температуры в циркуляционном трубопроводе

Часы	Температура, °C	Часы	Температура, °C
00:00	48	12:00	45
01:00	46	13:00	45
02:00	45	14:00	45
03:00	44	15:00	45
04:00	44	16:00	45
05:00	45	17:00	45
06:00	48	18:00	40
07:00	48	19:00	40
08:00	45	20:00	40
09:00	40	21:00	40
10:00	40	22:00	48
11:00	40	23:00	48

Как следует из рис. 2–5, фактическое среднесуточное значение температуры воды в циркуляционном трубопроводе снизилось более чем на 6 °C. Среднесуточные расходы воды в подающем и циркуляционном трубопроводе ГВС снизились соответственно на 37% и 48%, что привело к соответствующему снижению теплотребления системой. Снижение расхода тепловой энергии на подогрев воды составило в среднем более 15%.

В табл. 5 приведен сравнительный анализ режимных параметров работы систем ГВС в некоторых домах до и после настройки узлов регулирования. Как следует из табл. 5 средняя экономия по одному узлу регулирования составила более 90 Гкал/год. Можно предположить, что суммарная годовая экономия по всем 46 узлам составит более 2,9 млн. руб. При стоимости строительно-монтажных работ и оборудования узлов регулирования равной 3,5 млн. руб., простой срок окупаемости составит 1,2 года.

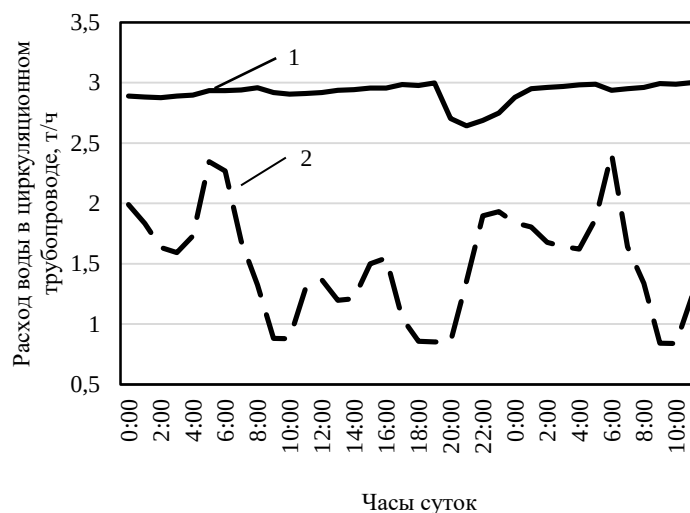


Рис. 2. Динамика изменения расхода воды в циркуляционном трубопроводе ГВС: 1 – до настройки узлов регулирования по графику, приведенному в табл. 4; 2 – после настройки узлов регулирования по графику, приведенному в табл. 4

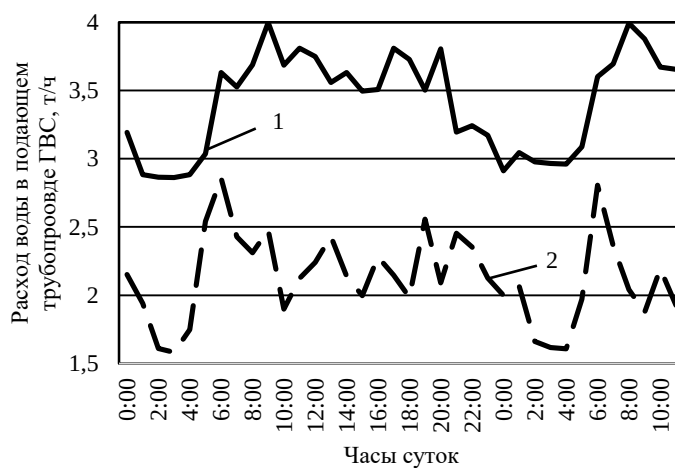


Рис. 3. Динамика изменения расхода воды в подающем трубопроводе ГВС: обозначения те же, что на рис. 2

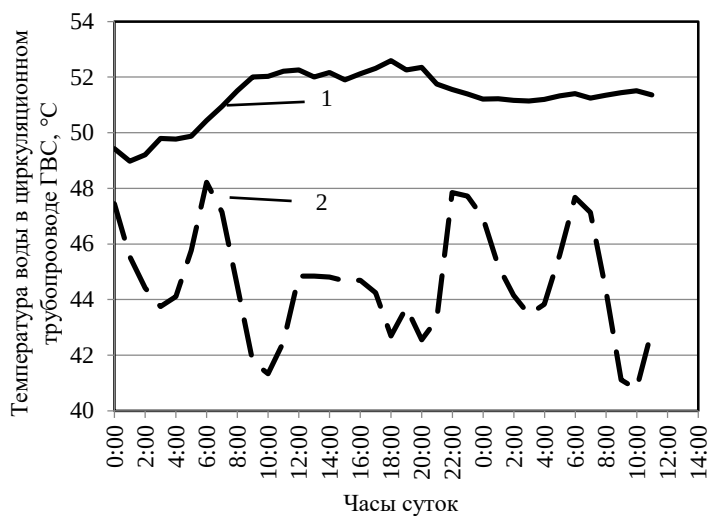


Рис. 4. Динамика изменения температуры воды в циркуляционном трубопроводе ГВС: обозначения те же, что на рис. 2

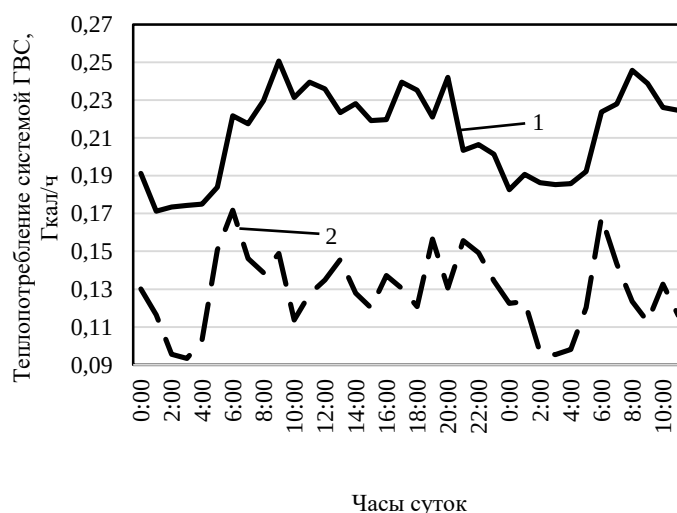


Рис. 5. Динамика изменения потребления теплоты в системе ГВС: обозначения те же, что на рис. 2

Однако одновременно с положительным экономическим эффектом наблюдается понижение температуры воды в подающем трубопроводе системы ГВС в периоды минимального потребления, что объясняется снижением циркуляционного расхода в это время. Так, на рис. 6 видно, что в периоды с 00:00 до 04:00 и с 10:00 до 20:00 температура воды в подающем трубопроводе ГВС имеет значения ниже 60 °С. Это отклонение потребовало дополнительной перенастройки узлов регулирования и повышения температуры воды в циркуляционном трубопроводе ГВС. Среднесуточное значение температуры воды в циркуляционном трубопроводе после перенастройки составило 46 °С.

Таблица 5

Сравнительный анализ режимных параметров систем горячего водоснабжения

Параметр	До регуливки	После регуливки
Ул. Гоголя, 10		
Температура воды в подающем трубопроводе ГВС, °С	63	62,8
Температура воды в циркуляционном трубопроводе ГВС, °С	50,3	44,3
Расход в подающем трубопроводе ГВС, т/ч	4,3	2,8
Расход в циркуляционном трубопроводе ГВС, т/ч	3,6	2,0
Расход тепловой энергии на нагрев воды, Гкал/т	0,1195	0,0998
Годовая экономия, Гкал/год		153
Ул. Врача Михайлова, 52, 1 ввод		
Температура воды в подающем трубопроводе ГВС, °С	65,6	60,0
Температура воды в циркуляционном трубопроводе ГВС, °С	51,4	44,4
Расход в подающем трубопроводе ГВС, т/ч	3,4	2,1
Расход в циркуляционном трубопроводе ГВС, т/ч	2,9	1,5
Расход тепловой энергии на нагрев воды, Гкал/т	0,123	0,096
Годовая экономия, Гкал/год		94
Ул. Врача Михайлова, 52, 2 ввод		
Температура воды в подающем трубопроводе ГВС, °С	61,5	57,6
Температура воды в циркуляционном трубопроводе ГВС, °С	54,9	45,8
Расход в подающем трубопроводе ГВС, т/ч	2,6	1,2
Расход в циркуляционном трубопроводе ГВС, т/ч	2,2	0,78
Расход тепловой энергии на нагрев воды, Гкал/т	0,096	0,078
Годовая экономия, Гкал/год		63

Изменение температуры обратной сетевой воды приводит к пропорциональному изменению выработки электроэнергии на тепловом потреблении [13, 14]. Согласно [13]

изменение мощности турбины $\Delta N_{\text{тур}}$, кВт/МВт, можно определить в расчете на 1 МВт тепловой нагрузки отборов турбин

$$\Delta N_{\text{тур}} = 4\Delta t_{\text{ос}} \alpha \eta_{\text{эм}} \quad (1)$$

где $\Delta t_{\text{ос}} = t_{\text{ос}}^{\text{баз}} - t_{\text{ос}}^{\text{нзм}}$ – разность между базовой $t_{\text{ос}}^{\text{баз}}$ и измененной $t_{\text{ос}}^{\text{нзм}}$ температурой обратной сетевой воды, °С; α – термодинамический коэффициент, учитывающий связь между температурой насыщения и теплоперепадом в точках адиабатического процесса расширения пара в турбине, кВт/(кг·°С); $\eta_{\text{эм}}$ – электромеханический КПД турбогенератора.

Расчеты по формуле (1) показывают, что при $\Delta t_{\text{ос}} = 4\text{--}6^\circ\text{C}$, выработка электроэнергии на тепловом потреблении $\Delta N_{\text{тур}}$ увеличивается на 13–20 кВт на 1 МВт тепловой нагрузки отборов турбины.

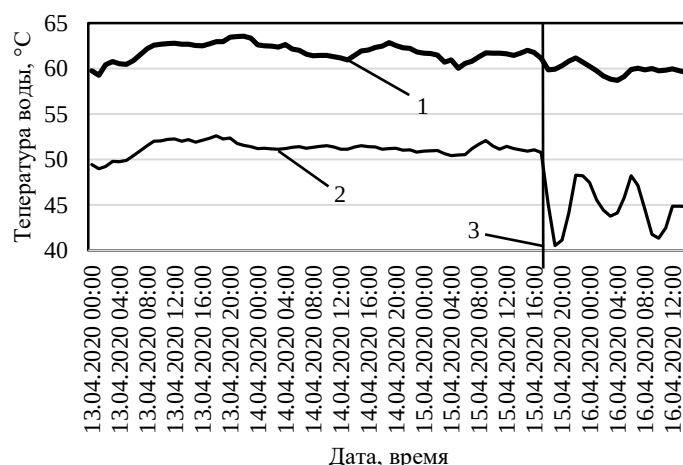


Рис. 6. Температура воды: 1, 2 – соответственно в подающем и циркуляционном трубопроводах системы ГВС; 3 – начало периода регулирования по графику в табл. 4

Как показывают проведенные исследования, регулирование расхода воды в циркуляционном трубопроводе в зависимости от режима потребления позволяет оптимизировать режим работы системы ГВС и добиться значительного технико-экономического эффекта. Однако динамическим способом регулирования нагрузки в системе ГВС также невозможно достигнуть расчетного норматива на подогрев и добиться значительного понижения температуры воды после системы горячего водоснабжения. При среднесуточных значениях температуры воды в циркуляционном трубопроводе равных $44\text{--}46^\circ\text{C}$ уже наблюдаются режимы, при которых не обеспечивается нормативное качество горячей воды. Можно с полной уверенностью утверждать, что в переходные периоды отопительного периода, когда температура воды после систем отопления существенно ниже 44°C , режим работы систем горячего водоснабжения будет негативно влиять на энергетическую эффективность ТЭЦ. Реальным выходом из сложившейся ситуации может быть снижение нормативной температуры горячей воды до 55°C и увеличение диапазона её регулирования [15], пересмотр методики формирования норматива расхода тепловой энергии на подогрев воды или отказ от этого норматива. При таких параметрах санитарно-гигиеническая надежность систем не будет ухудшаться и появляется возможность реализовать потенциал энергосбережения скрытый, в системах горячего водоснабжения.

Заключение

1. Расчетная величина норматива расхода тепловой энергии, используемой на подогрев холодной воды, не отвечает реальным условиям работы систем горячего водоснабжения. Несоответствие норматива обусловлено необходимостью выдерживать более высокую температуру горячей воды в системе теплоснабжения для обеспечения нормативных показателей качества у потребителей и поддерживать избыточный циркуляционный расход для компенсации тепловых потерь в периоды минимального водоразбора.

2. Известные и широко применяемые статические методы регулирования путем ограничения циркуляционного расхода дроссельными диафрагмами или установкой термостатических клапанов не позволяют приблизить фактическое теплотребление к установленным нормативным значениям и могут приводить к нарушению действующих показателей качества горячей воды.

3. Эффективность работы систем горячего водоснабжения можно существенно повысить путем динамического регулирования расхода и температуры циркуляционной воды с учетом суточной и недельной неравномерности режима их работы.

4. В системе теплоснабжения г. Ульяновска на ряде жилых домов реализовано динамическое регулирование нагрузки системы горячего водоснабжения. Несмотря на доказанную эффективность, при таком способе регулирования также не достигается расчетное значение норматива расхода тепловой энергии на подогрев воды для ГВС и отсутствует возможность значительного снижения температуры в циркуляционном трубопроводе из-за нормативных требований к качеству горячей воды в точках водоразбора.

5. Для повышения эффективности применяемых способов регулирования необходимо законодательно увеличить диапазон возможного регулирования температуры горячей воды. Кратковременное понижение температуры горячей воды до 50–55 °С не скажется на санитарной надежности систем горячего водоснабжения.

6. На наш взгляд, существующий метод расчета потребления в системах горячего водоснабжения не позволяет определять фактический расход тепловой энергии. Целесообразно пересмотреть методологию формирования норматива расхода тепловой энергии на подогрев воды или отказаться от метода расчета по нормативу.

Литература

1. Рафальская Т.А. Исследование возможности организации низкотемпературного теплоснабжения при центральном качественном регулировании / Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 102-112.
2. Xiaofang S., Peng W., Panhong R., Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network // MATEC Web of Conferences. 2016. 54 06004. doi: 10.1051/mateconf/20165406004
3. Администрация города Ульяновска: официальный сайт. Актуализированная схема теплоснабжения муниципального образования «город Ульяновск» до 2029 года. Доступно по: URL: <http://ульяновск.рф/ru/content/2029-2>. Ссылка активна на: 28.11.2020 г.
4. Администрация городского округа Самара. Актуализированная схема теплоснабжения городского округа Самара на период до 2032 года. URL: <https://www.samadm.ru/docs/official-publication/22345>. Ссылка активна на 28.11.2020 г.
5. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. Работа системы теплоснабжения при поэтапном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. С. 31-40.
6. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22(5). С. 71-82.
7. Рафальская Т.А. Мансуров Р.Ш. Оценка влияния температуры воды в системе горячего водоснабжения на температурный режим помещений // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. С. 42-49.
8. Семенов В.Г. Нормативы на подогрев горячей воды // Новости теплоснабжения. № 6-7. 2018. С. 8-17.
9. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // Journal of Physics: Conference Series . 2020. Т. 1683. С. 042017.
10. Rotov P.V., Zhukov D.A., Zhukova A.V., Sivukhin A.A. About economy of fuel and resources in the hot water supply system // Journal of Physics: Conference Series . 2017. Т. 891. С. 012160.
11. Ротов П.В. Сивухин А.А. Оценка эффективности технологий регулирования нагрузки горячего водоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. № 6. С. 22-28.
12. Tumanova T., Cimble A. The Technical-Economic Analysis of Hot Water Supply Systems for Residential Buildings // Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 “Advanced HVAC and Natural Gas Technologies” (Riga, Latvia, May 6 – 9). 2015. pp. 177–183. doi: 10.7250/rehvaconf.2015.025.
13. Яковлев, Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. М.: Новости теплоснабжения, 2008. 448 с.

14. Замалеев М.М., Шарапов В.И., Губин И.В., Павлов В.А. Технико-экономическое обоснование новых технологий утилизации снега на ТЭЦ. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. № 11-12. С. 3–9.

15. Pieper H, Ommen T S, Markussen W B and Elmegaard B 2017 Optimal Usage of Low Temperature Sources to Supply District Heating by Heat Pumps Proc. of ECOS 2017: 30th International Conference of Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (San Diego, California, USA, 2–6 July 2017) http://orbit.dtu.dk/files/134463914/ECOS_2017_paper_191.pdf.

Авторы публикации

Ротов Павел Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплогоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», Ульяновский государственный технический университет.

Сивухин Андрей Александрович – начальник производственно-технического отдела УМУП «Городской теплосервис».

Ротова Марина Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», Ульяновский государственный технический университет.

Гафуров Рустам Абдул-Ахатьевич – аспирант кафедры «Теплогоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», Ульяновский государственный технический университет.

Горишков Алексей Викторович – руководитель группы режимов и наладки филиала «Ульяновский» ПАО «Т Плюс».

References

1. Rafalskaya TA. Investigation of the possibility of organizing low-temperature heat supply with central quality contro. *Thermal Engineering*. 2019;11:102-112.
2. Xiaofang S, Peng W, Panhong R, Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network. MATEC Web of Conferences. 2016. 54 06004. doi: 10.1051/mateconf/20165406004.
3. Administration of the city of Ulyanovsk: official website. Updated heat supply scheme of the municipality «city of Ulyanovsk» until 2029. URL: <http://ульяновск.рф/ru/content/2029-2>. Circulation Date: 28.11.2020
4. Administration of the urban district of Samara. The updated heat supply scheme of the Samara city district for the period until 2032 is URL: <https://www.samadm.ru/docs/official-publication/22345>. Circulation Date: 28.11.2020
5. Zvonareva YuN., Vankov YuV. The work of the heat supply system with the phased introduction of automated individual heat points // *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2017;19:31-40.
6. Kikot EA, Gazizov FN. Choosing the structure of thermal generation in Russian cities when updating heat supply schemes. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2020. T22(5). pp. 71-82.
7. Rafalskaya TA, Mansurov RSh. Assessment of the influence of water temperature in the hot water supply system on the temperature regime of premises. *Water supply and sanitary equipment*. 2017. pp. 42-49.
8. Semenov VG. Standards for Hot Water Heating. *Heat Supply News*. 2018;6-7:8-17.
9. Rotov PV, Sivukhin AA, Gafurov RA, et al. About standards for hot water heating. *Journal of Physics: Conference Series* . 2020;1683:042017.
10. Rotov PV, Zhukov DA., Zhukova AV, et al. About economy of fuel and resources in the hot water supply system. *Journal of Physics: Conference Series* . 2017;891:012160.
11. Rotov PV, Sivukhin AA. Evaluation of efficiency of hot water supply load control technologies. *Energy saving and water treatment*. 2016;6:22–28.
12. Tumanova T, Cimbale A. The Technical-Economic Analysis of Hot Water Supply Systems for Residential Buildings. *Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 Advanced HVAC and Natural Gas Technologies*” (Riga, Latvia, May 6-9). 2015;177–183. doi: 10.7250/rehvaconf.2015.025.
13. Yakovlev BV. Improving the efficiency of heating and heat supply systems. M.: Heat supply news. 2008. 448 p.
14. Zamaleev MM, Sharapov VI, Gubin IV, et al. Feasibility study of new technologies for snow utilization at CHPP. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2016;11-12:3–9.
15. Pieper H, Ommen T S, Markussen W B and Elmegaard B 2017 Optimal Usage of Low Temperature Sources to Supply District Heating by Heat Pumps Proc. of ECOS 2017: 30th International Conference

Authors of the publication

Pavel V. Rotov – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Andrey A. Sivukhin – City Heating Service, Ulyanovsk, Ulyanovsk, Russia.

Marina A. Rotova – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Rustam A. Gafurov – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Alexey V. Gorshkov – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk Russia.

Получено

10 ноября 2020г.

Отредактировано

27 ноября 2020г.

Принято

9 декабря 2020г.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

А.Н. Качанов¹, Д.А. Коренков¹, А.А. Ревков¹, В.В. Максимов², О.В. Воркунов²,

¹Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева,
г. Орёл, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9164-8942>, kan@ostu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Длительность срока эксплуатации деревянных опор, применяемых на линиях электропередач напряжением до 35 кВ, зависит от качества проведения сушки и последующей пропитки пиломатериала. Сушка заготовок опор в настоящее время осуществляется атмосферным или конвективным способами и является наиболее продолжительным и одним из энергозатратных этапов их производства. В то же время, существуют перспективные электротехнологические сушильные установки, позволяющие сократить длительность и повысить качество процесса при сопоставимых удельных энергозатратах. К таким установкам следует отнести вакуумные высокочастотные комплексы, широкое внедрение которых осложнено рядом нерешенных научно-технических задач: оптимизацией процесса вакуумно-высокочастотной сушки и обеспечением равномерности электромагнитного поля в заготовках большой длины. Целью данной статьи является получение математического инструментария, позволяющего одновременно описать перекрестное влияние электромагнитных явлений и процессов теплопереноса в длинномерном пиломатериале и способствующего дальнейшему решению указанных проблем. МЕТОДЫ. Использованы положения теории электромагнитного поля, теплопереноса и теплообмена, методы математического моделирования, учтены результаты ранее проведенных исследований в области распределения электромагнитного поля в поперечном и продольном сечениях загрузки рабочей камеры. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получена одномерная математическая модель, отражающая влияние волнового характера распределения параметров электромагнитного поля по длине заготовок опор и параметров внешней среды на температуру и влагосодержание материала, отличающаяся возможностью применения простых алгоритмов анализа систем дифференциальных уравнений на основе метода конечных разностей и требующая меньшего количества исходных данных о свойствах высушиваемого материала. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты численного исследования с помощью предложенных модели и методики ее анализа сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными, на основе чего сделан вывод об адекватности и большей её эффективности, по сравнению с другими существующими моделями вакуумно-высокочастотной сушки. Дальнейшее использование представленного математического аппарата для оптимизации конструкции и режимов вакуумных высокочастотных комплексов под задачи сушки заготовок деревянных опор позволит в целом повысить надежность воздушных линий электропередач.

Ключевые слова: Сушка деревянных опор, сушка в электромагнитном поле, сушка в вакууме, электротехнологические установки для сушки, повышение надежности ВЛЭП, энерго- и ресурсосберегающие технологии.

Для цитирования: Качанов А.Н., Коренков Д.А., Ревков А.А., Максимов В.В., Воркунов О.В. Моделирование процессов высокочастотной сушки деревянных опор в вакуумной камере // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.

WORDS HIGH-FREQUENCY DRYING PROCESSES SIMULATION OF WOODEN TANGENT TOWERS IN A VACUUM CHAMBER

AN. Kachanov¹, DA. Korenkov¹, AA. Revkov¹, VV. Maksimov², OV. Vorkunov²

¹Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9164-8942>, kan@ostu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The service life duration of wooden tangent towers used on overhead transmission lines with a voltage of up to 35 kV depends on the quality of lumber drying and subsequent impregnation. The drying of tangent tower workpieces is currently carried out by atmospheric or convective methods and is the longest and one of the energy-consuming stages of their production. At the same time, there are promising electrotechnological drying installations that can reduce the duration and improve drying quality at comparable specific energy costs. Such installations include vacuum high-frequency complexes, the wide introduction of which is complicated by a number of unresolved scientific and technical problems like optimizing vacuum high-frequency drying modes and ensuring electromagnetic field uniformity in long workpieces. The purpose of this article is to obtain mathematical tools that simultaneously describe the cross-effects of electromagnetic phenomena and heat and mass transfer processes in long-sized lumber and contribute to the further solution of these problems. *METHODS.* The positions of the theory of electromagnetic field, heat mass transfer and heat mass exchange, methods of mathematical modeling were used for this purpose. Also the results of previous studies of electromagnetic field distribution in the cross-section and longitudinal sections of the working chamber loading are taken into account. *RESULTS.* A one-dimensional mathematical model is obtained. It describes the influence of electromagnetic wave distribution along the length of tangent towers and external medium parameters on the temperature and moisture content in the material. This model is characterized by the possibility of using simple algorithms for analyzing differential equation systems based on the finite difference method and requiring less initial data on the drying material properties. *CONCLUSION.* The obtained by using the proposed model and the method of its analysis the numerical study results are compared with the available experimental data. Based on this comparison it is concluded that the obtained model is adequate and more effective relative to other existing models of vacuum-high-frequency drying. Generally, further use of the presented mathematical toolkit to optimize the design and modes of vacuum high-frequency complexes in the task of drying wooden tangent towers will increase the reliability of overhead transmission lines.

Keywords: Drying of wooden tangent towers, drying in electromagnetic field, vacuum drying, electrotechnological installations for drying, increasing the reliability of overhead transmission lines, energy and resource saving technologies.

For citation: Kachanov AN, Korenkov DA, Revkov AA, Maksimov VV, Vorkunov OV. Words high-frequency drying processes simulation of wooden tangent towers in a vacuum chamber. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.

Введение

Несмотря на то, что конструкции и материалы для изготовления опор постоянно совершенствуются, о чём свидетельствуют непрекращающиеся исследования в этой области [1, 2], практический интерес к деревянным опорам не снижается. Исторически первыми опорами воздушных линий электропередач были именно деревянные. Низкая стоимость, доступность, достаточная механическая прочность и экологичность сырьевого материала стали причиной их широкого распространения, и впоследствии они стали применяться в распределительных сетях как низкого, так и высокого уровней напряжения. При производстве опор ЛЭП в качестве сырья используются заготовки мягких лиственных пород (береза, осина, ольха) длиной не более 8 м и хвойных пород (сосна, ель) длиной не более 12 м [3]. Технологии модификации древесины позволили поднять относительно низкие физико-механические свойства дешевых пород до уровня твердых лиственных пород, благодаря этому область применения деревянных опор сейчас ограничена уровнем напряжения 110 кВ, хотя, фактически, ввиду конструктивных

соображений они эксплуатируются на линиях не выше 35 кВ. Однако не только механическая прочность является критерием выбора материала опор, но также и долговечность, которая характеризуется нормативным сроком эксплуатации. Последний для деревянных пропитанных опор составляет 25 лет, для железобетонных – 40 лет, для металлических – 50 лет. Современные технологии модификации древесины в среднем позволяют приблизить срок службы к уровню железобетонных опор [3], но пока реализован не весь их потенциал. Очевидно, что дальнейшие научно-технические разработки в этой области должны быть сосредоточены на достижении следующей «психологической отметки» 50 лет.

Различные способы модификации древесины подразумевают проведение ряда технологических операций, например, пропитки специальными составами, выдержку в вакууме, прессования и других. При этом общим для всех способов является этап сушки, при котором из межклеточного пространства удаляется свободная влага, и освобождается место для модифицирующей жидкости. Качество сушки определяется множеством параметров, в том числе, конечным влагосодержанием, равномерностью влагосодержания по сечению и длине заготовки опоры и количеством образовавшихся в этом процессе дефектов. Равномерность сушки определяет то, насколько однородно будет выполнена последующая пропитка древесины. Основной вид дефектов при сушке оцилиндрованных заготовок – это растрескивания, чем их больше, и чем они глубже, тем сильнее будут взаимодействовать внутренние слои древесины с негативными атмосферными факторами. Таким образом, сушка – это ответственный этап производства деревянных опор ЛЭП, который во многом определяет качество проведения последующих операций, а, следовательно, влияет на срок эксплуатации конечной продукции.

В большинстве случаев заготовки опор высушиваются конвективными способами [4]: атмосферным или камерным. Конечное влагосодержание составляет при этом 0,28 кг/кг. Недостаток атмосферной сушки заключается в ее сезонности. Такая сушка возможна только в летний период и длится около трех месяцев, но не требует дополнительных затрат энергии, а получаемое при этом растрескивание считается эталонным. Камерная сушка позволяет сократить длительность процесса до недели и осуществляется в специальных установках, в которых тепловая энергия подводится к заготовкам посредством агента сушки – нагретого воздуха или пара. На входе в камеру воздух увлажняется, чтобы предотвратить чрезмерное высыхание поверхности древесины. В противном случае образуется недопустимый градиент влагосодержания, приводящий к чрезмерным дефектам сушки. При прохождении через штабель агент сушки насыщается влагой, после чего утилизируется в атмосферу вместе с тепловой энергией. Это обуславливает низкую энергетическую эффективность такого оборудования. Меньшее распространение получил способ сушки в специальных автоклавах под вакуумом. Длительность такого способа сопоставима с конвективным камерным, но удельные энергозатраты оказываются больше. Вместе с тем, уже существуют перспективные научно-технические разработки, позволяющие снизить длительность сушки при сопоставимых или меньших затратах энергии и основанные на диэлектрическом нагреве [5-7].

Первые камеры для высокочастотной диэлектрической сушки появились в середине прошлого века. В том виде технология сушки себя не зарекомендовала, поэтому на смену ей пришли комбинированные технологии: конвективно-диэлектрическая и вакуумно-диэлектрическая. Последняя обладает рядом преимуществ, не доступным для конвективного, диэлектрического и вакуумного способа по отдельности. Сушка осуществляется в газопаровой смеси низкого давления, в связи с этим устраняется большой градиент влагосодержания по сечению материала. Одновременно снижается температура кипения влаги, поэтому высокочастотный нагрев проводится не более чем до 80 °С, что означает пониженные тепловые потери через стенки камеры и сохранение механических свойств материала. Среди преимуществ также следует отметить высокую скорость сушки, которая до 10 раз выше, чем скорость камерной сушки. При сопоставимых объемах загрузки вакуумно-высокочастотной и конвективной камер за счет высокой производительности первая способствует снижению себестоимости сушки 1 м³ пиломатериалов [8].

Вместе с тем остается ряд нерешенных вопросов, затрудняющих эффективное использование вакуумно-высокочастотной технологии для сушки не только заготовок деревянных опор, но и других длинномерных изделий из этого материала. Во-первых, существующее высокочастотное оборудование требует большого расхода

электроэнергии. Это приводит к снижению конкурентоспособности таких камер по сравнению с конвективными, объем загрузки которых в несколько раз больше. В целом использование вакуумно-высокочастотной технологии сушки на текущем этапе её развития рекомендуется для пиломатериалов толстых сечений (в том числе заготовок опор), ценных пород и пород с большой плотностью. Во-вторых, размещение заготовок большой длины в существующих конструкциях высокочастотных камер неизбежно сопровождается неравномерным распределением электромагнитных полей, что, в итоге, приводит к неравномерности сушки. В третьих, требуется доработка технологических режимов сушки пиломатериалов большого сечения. Все отмеченное ставит задачу проведения дальнейших теоретических исследований в данной области с целью совершенствования рассматриваемого способа. Для этого необходимы математические модели, адекватно описывающие процессы, протекающие в камере и материале большой длины. Получение такого математического аппарата является целью данного исследования, а его актуальность не вызывает сомнений, поскольку оно направлено на устранение указанных ограничений использования вакуумно-высокочастотной сушки для заготовок деревянных опор ЛЭП. Успешное преодоление ограничений позволит добиться положительных энергосберегающего и экономического эффектов за счет сокращения продолжительностей сушки и цикла производства опор ЛЭП в целом. Дополнительный положительный эффект заключается в обеспечении высокого качества сушки, необходимого для достижения длительного срока их эксплуатации.

В наиболее общем виде их структурная схема вакуумно-высокочастотных камер показана на рис. 1.

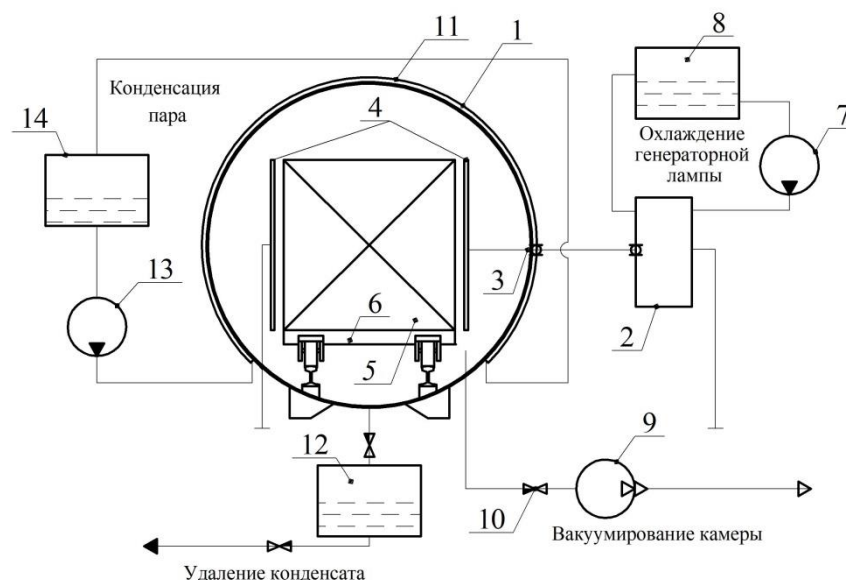


Рис. 1. Структурная схема вакуумно-высокочастотной камеры

1 – рабочая камера; 2 – ВЧ генератор; 3 – ВЧ токопровод; 4 – обкладки рабочего конденсатора; 5 – штабель пиломатериала; 6 – подштабельная тележка; 7 – вакуумный насос; 8 – обратный клапан; 9 – охлаждающая рубашка; 10 – сборник конденсата; 11 – циркуляционный насос системы конденсации пара; 12 – резервуар с холодной водой

Корпус рабочей камеры 1 объемом V представляет собой металлическую оболочку, обычно цилиндрической формы. Как можно ближе к ней устанавливается ВЧ генератор 2, подающий по высокочастотным фидерам 3 напряжение U частотой f на обкладки 4 рабочего конденсатора. Между обкладками располагается высушиваемый материал 5 на подштабельной тележке 6.

После включения генератора под действием релаксационно-поляризационных явлений и диэлектрических потерь в материале образуются внутренние источники теплоты Q_v , и температура T его внутренних зон стремительно увеличивается, образуется градиент температуры $\overline{grad T}$, направленный внутрь материала. В материале начинает интенсивно испаряться влага, парциальное давление пара становится больше давления окружающей среды $P_{ср}$ в камере, которое перед началом сушки понижается вакуумным насосом 7. После его отключения натекание газа предотвращается обратным клапаном 8. Благодаря капиллярно-пористому строению древесины возле её

поверхности давление релаксируется, так возникает градиент избыточного давления $\overline{\text{grad } P}$, направленный к внутренним зонам. Под действием градиентов температуры и давления создаются термодиффузионный и фильтрационный потоки влаги к поверхности. Из-за испарения влагосодержание u во внутренних зонах оказывается меньше, чем в поверхностных. Так появляется градиент влагосодержания и соответствующий диффузионный поток влаги $\overline{\text{grad } u}$, направленный вглубь материала и препятствующий удалению влаги из него. Фильтрационный механизм переноса парообразной влаги к поверхности является преобладающим и объясняет высокую интенсивность вакуумно-высокочастотной сушки [9, 10].

Перемещенная под действием механизмов термо- и фильтрационной диффузии к поверхности влага испаряется в окружающее пространство, а затем конденсируется на стенках рабочей камеры и стекает в сборник конденсата 10. Для обеспечения этого процесса предусматривается система конденсации пара, состоящая из окружающей рабочую камеру охлаждающей рубашки 9, по которой за счет насоса 11 непрерывно циркулирует охлаждающая жидкость, подаваемая из резервуара 12.

Таким образом, вакуумно-высокочастотная сушка представляет собой совокупность сложных электрофизических, термодинамических и процессов тепломассопереноса и тепломассообмена.

Во многих отечественных [11] и зарубежных исследованиях [12] для описания совокупности процессов тепло- и массопереноса внутри материала, протекающих под действием термодиффузионного, концентрационного и фильтрационного механизмов переноса влаги используется система уравнений Лыкова:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a_t \nabla^2 T + \frac{\xi \cdot r}{c} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{Q_v}{c \cdot \rho_0} \\ \frac{\partial u}{\partial t} = a_m \delta \nabla^2 T + a_m \nabla^2 u + \xi \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\xi}{c_v} \frac{\partial u}{\partial t} + a_p \nabla^2 P \end{cases}, \quad (1)$$

где a_t – коэффициент температуропроводности, м²/сек; ξ – критерий фазового превращения; r – удельная теплота испарения влаги, Дж/кг; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°C); ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; a_m – коэффициент влагопроводности (диффузии влаги), м²/сек; δ – относительный коэффициент термодиффузии влаги, кг/(кг·°C); c_v – паромкость материала, 1/Па; a_p – коэффициент конвективной фильтрационной диффузии, м²/сек.

Трудность, с которой приходится сталкиваться при использовании полной системы (1), заключается в необходимости наличия сведений о тепло-, влаго- и паропроводящих свойствах исследуемого материала. Соответствующие коэффициенты сложным образом зависят от его температуры, влагосодержания, внутреннего давления, направления волокон и других факторов, многие взаимосвязи еще вовсе не изучены, либо информация о них ограничена или противоречива. Организация численного решения системы (1) даже в двухмерной постановке достаточно сложна и ввиду отсутствия полных данных о функциональных взаимосвязях коэффициентов a_t , a_m , a_p и δ с параметрами T , u , P в разных направлениях волокон древесины не приводит к точному результату. Это заставляет исследователей различными способами упрощать систему (1), сводя ее к двум уравнениям за счет использования эффективных коэффициентов или решать в одномерной постановке [13]. Попытки моделирования тепломассопереноса при вакуумно-высокочастотной сушке пиломатериалов большой длины (более 2 м) в одномерной постановке показали количественно противоречивый результат в виде чрезмерно большой продолжительности процесса, что можно объяснить большим гидродинамическим сопротивлением вдоль материала и отсутствием удаления влаги в перпендикулярном направлении. С использованием допущения [14], которое учитывает убыль влаги за счет фильтрационного движения пара под действием градиента давления в виде (2):

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{Q_v}{r \cdot \rho_0}, \quad (2)$$

система (1) была упрощена до двух уравнений, а задача тепломассопереноса составлена в одномерной постановке (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_t(T, u) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{Q_v(x, t)}{c(T, u) \cdot \rho_0} (1 - \xi(T, u)) \\ \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m(T, u) \left(\delta(T, u) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) - \xi(T, u) \frac{Q_v(x, t)}{\rho_0 \cdot r(T)} \end{cases} \quad (3)$$

Для описания процессов тепло- и массообмена с внешней средой заданы правые граничные условия (4) по аналогии с указанными в [15]:

$$\lambda_x(T, u) \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = \alpha_t(T_{cp} - T(L, t)) + r(T) \cdot j(t), \quad (4.1)$$

$$\rho_0 \cdot a_m(T, u) \left(\delta(T, u) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) = j(t), \quad (4.2)$$

$$j(t) = \alpha_m \rho_n(T) (u_{cp}(T_{cp}, P_{cp}) - u(L, t)), \quad (4.3)$$

где λ_x – теплопроводность вдоль волокон, Вт/(м·°C); α_t – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°C); T_{cp} – температура среды, °C; j – поверхностный поток влаги, кг/(м²·с); α_m – коэффициент влагообмена, м/с; ρ_n – плотность пара, кг/м³; u_{cp} – равновесная влажность среды, кг/кг.

Начальные условия сформулированы следующим образом (5):

$$T(x, 0) = T_0; \quad u(x, 0) = u_0, \quad (5)$$

где T_0 и u_0 – начальные температура и влагосодержание материала.

Качество высушенной заготовки опоры зависит от многих факторов. Перепад влагосодержания по толщине пиломатериала в процессе сушки не должен превышать допустимого значения, а по его окончании распределение влагосодержания по объему должно быть как можно равномернее. Это означает, что скорость сушки во всех внутренних зонах материала должна быть одинаковой. Из приведенной выше математической модели тепломассопереноса следует, что скорость сушки в основном зависит от скорости парообразования, которая определяется удельной мощностью внутренних источников теплоты в рассматриваемой точке. Поэтому для адекватного описания тепломассопереноса необходимо правильно задавать распределение внутренних источников теплоты, что согласно выражению (6):

$$Q_v(x, t) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(T, u) \operatorname{tg} \delta(T, u) |\dot{E}(x)|^2 \quad (6)$$

сводится к задаче нахождения распределения напряженности электрического поля [16].

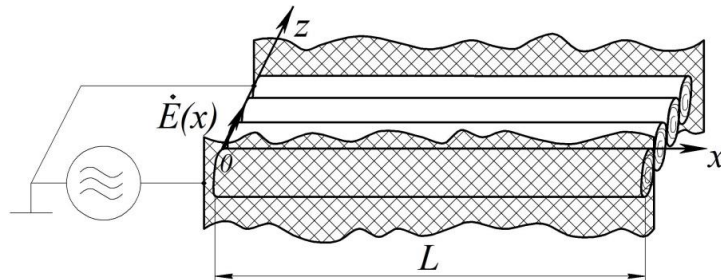


Рис. 2. Фрагмент рабочего конденсатора, заполненного заготовками опор

В продольном направлении размеры штабеля (рис. 2) соизмеримы с длиной электромагнитной волны. Это вызывает необходимость учитывать влияние на процесс сушки волновых электромагнитных явлений, которые приводят к образованию по длине пиломатериала узлов и пучностей напряженности электрического поля. Описание электромагнитного поля в продольном направлении штабеля основывается на системе уравнений Максвелла, которая после ряда допущений и преобразований сводится к уравнению Гельмгольца (7):

$$\frac{\partial^2 \dot{E}(x)}{\partial x^2} - \tilde{k}^2(x) \dot{E}(x) = 0, \quad (7)$$

где $\tilde{k}(x)$ – функция распределения волнового коэффициента, зависящая от меняющихся в процессе сушки диэлектрических свойств среды:

$$\tilde{k}(x) = i \cdot 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon(T, u) (1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta(T, u))}. \quad (8)$$

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, описанных в [17, 18] показали высокую степень достоверности применения (7) и (8) для анализа распределения напряженности электрического поля вдоль штабеля совместно с

граничными условиями (9):

$$\frac{\partial \dot{E}(0)}{\partial x} = \tilde{k}(0) \cdot (\dot{E}(0) - E_{\max}); \quad \frac{\partial \dot{E}(L)}{\partial x} = 0; \quad E_{\max} = U / W, \quad (9)$$

где $E_{\max}$ – амплитуда напряженности электрического поля падающей волны, В/м, W – расстояние между обкладками, м. Первое условие устанавливается в точках подключения ВЧ генератора, второе – на свободных концах обкладок рабочего конденсатора. Поскольку с целью повышения равномерности электромагнитного поля ВЧ генератор подключается к обкладкам по центру, то под L на рис. 2 и в формулах (4) и (9) следует понимать половину длины штабеля. Начало координат при этом располагается посередине штабеля, тогда левое граничное условие для задачи тепломассопереноса имеет вид (10):

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

Совместное рассмотрение задач тепломассопереноса (2)-(5) и электромагнитной (10)-(12) позволяет математически отразить процессы, происходящие внутри материала при вакуумно-высокочастотной сушке, однако для целостного описания всех явлений необходимо учесть изменение параметров внешней среды в рабочей камере, так как они влияют на интенсивность тепло- и влагообмена на поверхности материала. Изменение температуры и давления окружающей среды описываются уравнениями (11):

$$\frac{dP_r(t)}{dt} = P_r(t) \left(\frac{1}{T_{cp}(t)} \frac{dT_{cp}(t)}{dt} - \frac{Q_{с.г.}}{V_{св}} \right); \quad (11.1)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \frac{S R T_{cp}(t)}{V_{св} \mu_n} j(t) - P_n(t) \left(\frac{Q_{с.п.}}{V_{св}} - \frac{1}{T_{cp}(t)} \frac{dT_{cp}(t)}{dt} \right); \quad (11.2)$$

$$\frac{dT_{cp}(t)}{dt} = \left(\frac{(\alpha_t S (T(L, t) - T_{cp}(t)) + c_n S T(L, t) j(t)) R}{(\mu_n p_n + \mu_r p_r) c_{cp} V_{св}} - \frac{Q_{с.г.} + Q_{с.п.}}{V_{св}} \right) T_{cp}(t), \quad (11.3)$$

где P_n, P_r – давление пара и газа соответственно, Па; S – площадь поверхности материала, м²; R – универсальная газовая постоянная; $V_{св}$ – свободный объем камеры, м³; ρ_n, ρ_r – молярная масса пара и газа соответственно, кг/моль; $Q_{с.п.}, Q_{с.г.}$ – производительности систем удаления пара и газа, м³/с; c_n, c_{cp} – теплоемкость пара и парогазовой среды соответственно, Дж/(кг·°C). Давление среды P_0 , Па, равно сумме парциальных давлений пара и газа (12):

$$P_{cp}(t) = P_n(t) + P_r(t). \quad (12)$$

Начальные условия для этой задачи заданы в виде (13):

$$T_{cp}(0) = T_{cp0}; \quad P_{cp}(0) = P_{атм}, \quad (13)$$

где T_{cp0} – начальная температура окружающей среды, °C; $P_{атм}$ – начальное давление в камере, принимаемое равным атмосферному, Па.

Таким образом, на основе анализа литературных источников и с использованием результатов ранее проведенных исследований получен математический аппарат, описывающий влияние волнового характера распределения параметров электромагнитного поля по длине заготовок опор и параметров внешней среды на температуру и влагосодержание материала. Его отличие от существующих математических моделей [19, 20] вакуумно-высокочастотной сушки заключается в возможности применения простых методов анализа систем дифференциальных уравнений и требовании меньшего количества исходных данных о свойствах высушиваемого материала.

Материалы и методы

Так как в представленной модели отражены взаимосвязи различных физических явлений, а свойства материала имеют нелинейный характер зависимости от температуры и влагосодержания, то для нее может быть проведен только численный анализ. При этом одномерность задачи позволяет выбрать численный метод конечных разностей, для которого шаг по времени и шаг по координате x определяются соотношениями:

$$\Delta t = t_{\max} / (N_t - 1); \quad \Delta x = L / (N_x - 1), \quad (14)$$

где N_t, N_x – количество узлов по времени и по координате конечно-разностной сетки.

Алгоритм расчета в виде блок-схемы показан на рис. 3. Исходными данными являются следующие параметры: $L, W, S, V_{св}, U, f, Q_{с.п.}, Q_{с.г.}, T_0, u_0, T_{cp0}, P_{атм}, \rho_0$; коэффициенты переноса и теплофизические свойства часто применяемой для

производства опор хвойной породы (сосны): $a_t(T, u)$, $a_m(T, u)$, $\delta(T, u)$, $\xi(T, u)$, $r(T)$, $c(T, u)$, $\varepsilon(T, u)$, $\text{tg}\delta(T, u)$.

На первом этапе расчета вычисляется распределение внутренних источников теплоты для текущего временного слоя i . Сначала по (15) находятся значения волнового коэффициента в j -х узлах пространственной сетки:

$$\tilde{k}_j = i \cdot 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) (1 - i \cdot \text{tg}\delta(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}))}. \quad (15)$$

После конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения второго порядка (7) и граничных условий (9) получается система уравнений (16):

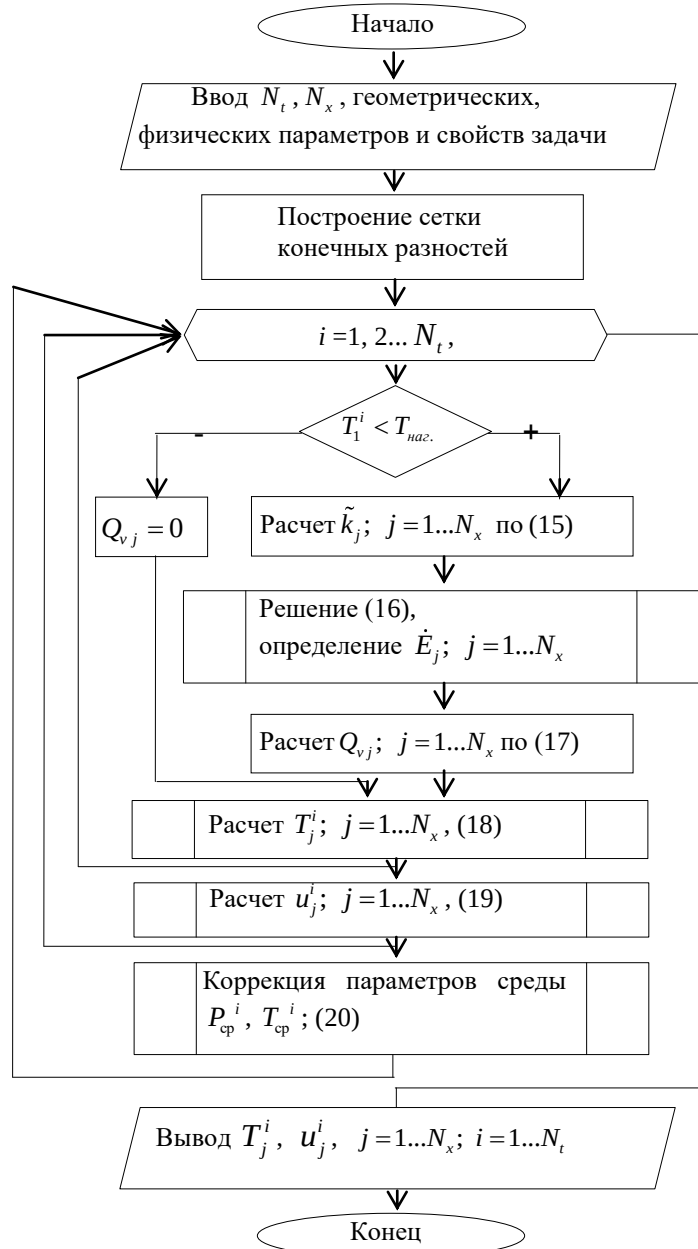


Рис. 3. Алгоритм анализа математической модели

$$\begin{cases} \dot{E}_j (1 + \tilde{k}_j \Delta x) - \dot{E}_{j+1} = \tilde{k}_j \Delta x \cdot E_{\max} & \text{при } j = 1; \\ \frac{1}{\Delta x^2} \dot{E}_{j-1} - \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \tilde{k}_j^2 \right) \dot{E}_j + \frac{1}{\Delta x^2} \dot{E}_{j+1} = 0 & \text{при } j = 2 \dots N-1; \\ \dot{E}_j - \dot{E}_{j-1} = 0 & \text{при } j = N_x. \end{cases} \quad (16)$$

Система линейных алгебраических уравнений решается матричным методом, в результате чего находятся значения напряженности электрического поля в узлах сетки, а по ним – значения удельной мощности внутренних источников:

$$Q_{vj} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(T_j^{i-1}; u_j^{i-1}) \operatorname{tg} \delta(T_j^{i-1}; u_j^{i-1}) |\dot{E}_j|^2. \quad (17)$$

Если на каком-либо шаге по времени температура в центре материала ($j = 1$) превышает заданную температуру нагрева, то во всех точках задается отсутствие внутренних источников теплоты, что физически означает отключение ВЧ генератора.

В следующем вычислительном блоке в две стадии решается задача тепломассопереноса с применением явной схемы. На первой для текущего временного слоя рассчитывается поле температуры (18):

$$T_j^i = T_{j+1}^i \text{ при } j = 1; \quad (18.1)$$

$$T_j^i = T_j^{i-1} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\begin{aligned} & \frac{a_t(T_{j+1}^{i-1}, u_{j+1}^{i-1}) + a_t(T_{j+1}^{i-1}, u_{j+1}^{i-1})}{2} (T_{j+1}^{i-1} - T_j^{i-1}) - \\ & - \frac{a_t(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) + a_t(T_{j-1}^{i-1}, u_{j-1}^{i-1})}{2} (T_j^{i-1} - T_{j-1}^{i-1}) + \\ & + \frac{Q_{vj} \cdot \Delta x^2}{c(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) \cdot \rho_0} \end{aligned} \right) \text{ при } j = 2 \dots N_x - 1; \quad (18.2)$$

$$T_j^i = T_{j-1}^i + \frac{2\Delta x (\alpha_t(T_{cp}^{i-1} - T_j^{i-1}) + r(T_j^{i-1}) \cdot j^i)}{\lambda_x(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) + \lambda_x(T_{j-1}^{i-1}, u_{j-1}^{i-1})} \text{ при } j = N_x; \quad (18.3)$$

$$j^i = \alpha_m \rho_n (T_N^{i-1}) (u_{cp}^{i-1} - u_N^{i-1}). \quad (18.4)$$

На второй стадии осуществляется расчет поля влагосодержания (19):

$$u_j^i = u_{j+1}^i \text{ при } j = 1; \quad (19.1)$$

$$u_j^i = u_j^{i-1} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\begin{aligned} & \frac{a_m(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1}) + a_m(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1})}{2} (u_{j+1}^{i-1} - u_j^{i-1}) - \\ & - \frac{a_m(T_j^i, u_j^{i-1}) + a_m(T_{j-1}^i, u_{j-1}^{i-1})}{2} (u_j^{i-1} - u_{j-1}^{i-1}) + \\ & + \frac{\psi(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1}) + \psi(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1})}{2} (T_{j+1}^i - T_j^i) - \\ & - \frac{\psi(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) + \psi(T_{j-1}^{i-1}, u_{j-1}^{i-1})}{2} (T_j^{i-1} - T_{j-1}^{i-1}) - \\ & - \xi(T_j^i, u_j^{i-1}) \frac{Q_{vj} \Delta x^2}{\rho_0 \cdot r(T_j^i)} \end{aligned} \right) \text{ при } j = 2 \dots N_x - 1; \quad (19.2)$$

$$u_j^i = u_{j-1}^{i-1} + \Delta x \left(\begin{aligned} & \frac{j^i}{\rho_0 (a_m(T_j^i, u_j^{i-1}) + a_m(T_{j-1}^i, u_{j-1}^{i-1}))} - \\ & - \frac{\delta(T_j^i, u_j^{i-1}) + \delta(T_{j-1}^i, u_{j-1}^{i-1})}{2} \frac{T_j^i - T_{j-1}^i}{\Delta x} \end{aligned} \right) \text{ при } j = N_x, \quad (19.3)$$

где $\psi(T, u) = a_m(T, u) \delta(T, u)$.

На последнем этапе расчета корректируются параметры окружающей среды (20):

$$T_{cp}^i = T_{cp}^{i-1} + \Delta t \cdot \left(\frac{(\alpha_t S (T_{N_x}^i - T_{cp}^{i-1}) + c_n S T_{N_x}^{i-1} j^i) R}{(\mu_n p_n + \mu_r p_r) c_{cp} V_{cv}} - \frac{Q_{с.г.} + Q_{с.п.}}{V_{cv}} \right) T_{cp}^{i-1}; \quad (20.1)$$

$$P_r^i = P_r^{i-1} + \Delta t \cdot P_r^{i-1} \left(\frac{1}{T_{cp}^i} \frac{T_{cp}^i - T_{cp}^{i-1}}{\Delta t} - \frac{Q_{с.г.}}{V_{cv}} \right); \quad (20.2)$$

$$P_n^i = P_n^{i-1} + \Delta t \left(\frac{S R T_{cp}^i}{V_{cv} \mu_n} j^i - P_n^{i-1} \left(\frac{Q_{с.п.}}{V_{cv}} - \frac{1}{T_{cp}^i} \frac{T_{cp}^i - T_{cp}^{i-1}}{\Delta t} \right) \right) \quad (20.3)$$

$$P_{cp}^i = P_r^i + P_n^i \quad (20.4)$$

Результаты

Проверка адекватности математической модели и точности методики ее анализа проведена путем сравнения полученных теоретических результатов с экспериментальными. В работе [21] использовалась вакуумно-высокочастотная камера, укомплектованная генератором с параметрами: $U_{max} = 1$ кВ, $f = 27$ МГц. Сушка образцов

древесины хвойной породы (Криптомерия японская) размером 0,85 x 0,12 x 0,12 м проводилась при температуре нагрева 60 °С и давлении в камере 6,7 кПа. Постоянство температуры нагрева обеспечивалось двухпозиционным регулированием по её значению в центре образцов. Начальное влагосодержание составляло $u_0 = 0,558$ кг/кг.

Исходные данные для моделирования были согласованы с условиями проведения эксперимента [21]. Время сушки устанавливалось 16 ч, число узлов временной сетки $N_t = 1000$, а пространственной $N_x = 30$. Недостающие сведения определены на основе предварительных численных экспериментов. Так было установлено, что напряжение на электродах не было постоянным, а регулировалось таким образом, чтобы в материале поддерживалась удельная мощность внутренних источников, равная 5,8 кВт/м³. Соответствующие изменения были внесены в математическую модель. Дополнительно был определен верхний предел регулирования напряжения на обкладках, который оказался ниже максимального значения для данного генератора. Это, а также тот факт, что полученное значение лежит в рекомендуемом для высокочастотной сушки диапазоне удельной мощности, свидетельствует о непротиворечивости модели. Однако окончательный вывод об адекватности модели можно сделать только после анализа ее точности.

Результаты расчетов получены в виде массива данных, содержащего значения температуры и влагосодержания в узлах пространственной сетки для каждого шага по времени ($(T_j^i, u_j^i, j=1..N_x; i=1..N_t)$). Путем обработки исходного массива с помощью простых алгоритмов сформированы векторы значений температуры в период нагрева в центре и на поверхности материала ($T_1^i, T_{N_x}^i, i=1...250$), которые затем были интерполированы и представлены в виде непрерывных функций на рис. 4. Аналогичным образом получен график зависимости среднего влагосодержания от времени сушки, показанный на рис. 5.

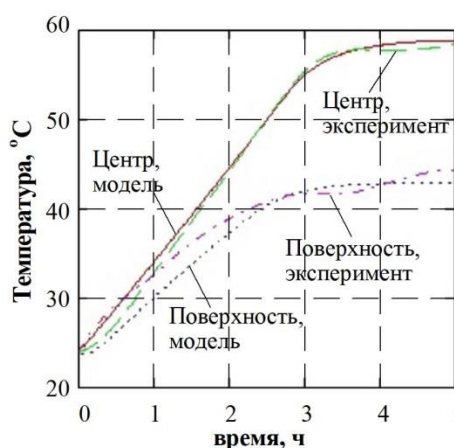


Рис. 4. Изменение температуры в центре и на поверхности материала на стадии нагрева по результатам моделирования и эксперимента

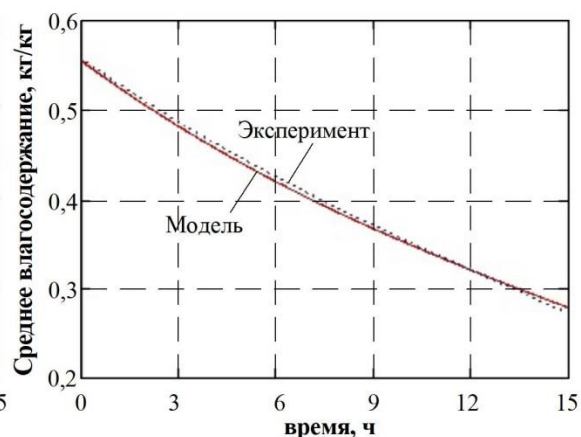


Рис. 5. Изменение среднего влагосодержания в процессе сушки по результатам моделирования и эксперимента

Обсуждение

Теоретические и экспериментальные кривые, описывающие нагрев в центре материала (рис. 4), практически совпадают, что свидетельствует о достаточно точном моделировании процесса во внутренних зонах. Явления, возникающие в поверхностных зонах, более разнообразны и требуют точного задания граничных условий, что не всегда возможно по описанным причинам. Например, в данной работе коэффициент конвективного теплообмена задавался постоянным, но в действительности зависит от многих факторов: способа обработки поверхности опор, температуры и влагосодержания древесины, а также от параметров окружающей среды. Несмотря на это, по окончании нагрева и модель, и эксперимент демонстрируют одинаковую температуру поверхности 42 °С.

Кривые изменения среднего влагосодержания во времени сушки (рис. 5) также совпадают. Абсолютная погрешность не превышает 0,006 кг/кг, что относительно начального влагосодержания составляет 1,07 %.

Дополнительные численные эксперименты, проведенные без учета распределения электромагнитного поля (15-17), показали существенное отличие теоретических и экспериментальных кривых, как для температуры, так и для среднего влагосодержания.

Отличия заключались в полуторакратном увеличении скорости нагрева и сушки, что противоречит экспериментальным данным. Это подтвердило необходимость учета взаимного влияния распределения внутренних источников теплоты и изменения температуры и влагосодержания в процессах нагрева и сушки.

Выводы

Использованное допущение (2) позволило упростить исходную модель тепломассопереноса и отказаться от рассмотрения взаимного влияния трех его движущих факторов, а одномерная постановка задачи с учетом распределения внутренних источников теплоты оказалась подходящей для объектов большой длины. Как результат, количество требуемых исходных данных было уменьшено, что неоднозначно повлияло на применимость модели. С одной стороны, в силу простоты реализации и достаточной адекватности ее следует считать эффективным средством проведения дальнейших исследований в области оптимизации конструкции (с точки зрения равномерности процесса) рабочих камер вакуумно-высокочастотных установок для сушки деревянных опор ЛЭП и других длинных пиломатериалов. С другой стороны, полученный одномерный математический аппарат не позволяет исследовать перепад влагосодержания по сечению материала. Таким образом, он не применим для задач оптимизации режимов сушки, которые могут быть решены на основе уже существующих моделей.

Литература

1. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С. Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. № 5-6. С. 93-101.
2. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С. Разработка методики и специального стенда ИС-1 для испытания опор контактных сетей электрического транспорта // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19. № 1-2. С. 152-163.
3. Медведев И.Н. Разработка технологии и оборудования для получения заготовок шпал и опор линий электропередач из модифицированной древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 6. С. 102–109.
4. Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Зиятдинова Д.Ф., Степанова О.Т. Конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т.21. № 5. С. 29-37.
5. Галкин В.П., Курышов Г.Н., Косарин А.А., Моисеев С.А., Деянов Д.И. Сушка крупных пило- и лесоматериалов // Лесной вестник/ Forestry Bulletin. 2018. Т. 2. № 2. С. 59-68.
6. Mohd-Jamil A.W., Zairul A.R. Mechanical Properties of Timber Dried Using Radio Frequency–Vacuum System. In: Pradhan B. (eds) GCEC 2017. GCEC 2017. Lecture Notes in Civil Engineering, V. 9. Springer, Singapore. 2017. P. 185-192.
7. Zhao, X., Lee C. (2020). Characteristics of radio-frequency/vacuum combined with mechanical press drying of heavy softwood timbers with longitudinal kerf. *Holzforschung*, 2020. V. 75. № 1. P. 48–55.
8. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Выбор способа сушки древесины по критерию себестоимости // 11 международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и ресурсосбережение - 21 век». г.Орел, 2013. С. 211-213.
9. Boldor D.A., Sanders T.H., Swartzel K.R., Farkas B.E. Model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying // J. of Food Process Engineering. 2005. V. 28. P. 68-87.
10. Марков А.В., Юленец Ю.П. Механизм массопереноса в высокоинтенсивных процессах сушки при наличии внутренних источников тепла // Теор. основы химической технологии. 2002. Т. 36. № 3. С. 268-274.
11. Комаров В.В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т.13. № 4. С. 57-63.
12. Younsi R., Kadem S., Lachemet A., Kocaefe D. Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation. *Thermal Science*. 2015. V. 19. № 2. P. 693-702.
13. Горешнев М.А., Казарин, А.Н., Алексеев М.В. Моделирование тепломассопереноса древесины при нагреве в камере с пониженным давлением // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2010. Т. 3. С. 172-173.
14. Синютин Е.В., Юленец Ю.П. Автоматизированная система управления оптимальным режимом сушки древесины в высокочастотном электрическом поле // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. №8. С. 1-7.

15. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разреженной среде // Лесной журнал. 2006. № 4. С. 64-71.
16. Chai Hao-jie, Zhao Jing-Yao, Cai Ying-Chun. An analysis of heating uniformity in wood high-frequency drying. *Wood and Fiber Science*. 2018. Vol. 50. № 3. P. 337-345. DOI: 10.22382/wfs-2018-032.
17. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Описание электромагнитного поля в плоском конденсаторе при высокочастотном нагреве длинномерных диэлектриков // Вестник КрасГАУ. 2016. № 10(121). С. 137-143.
18. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Математическая модель распределения электромагнитного поля в длинных плоских конденсаторах с диэлектриком из древесины // Промышленная энергетика. 2016. № 9. С. 23 -27.
19. Jia, X. Radio frequency vacuum drying of timber. Mathematical model and numerical analysis [Text] / X. Jia, J. Zhao, Y. Cai // *BioResources*. 2015. V. 10(3). P. 5440-5459.
20. Koumoutsakos A., Avramidis, S., Hatzikiriakos, S. Radio frequency vacuum drying of wood. I. Mathematical model. *DRYING TECHNOLOGY*. 2001 V. 19(1). P. 65-84.
21. Liu H.H., Yang L., Cai Y., Hayashi K., Li K. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying [Text] // *Bio Resources*. 2014. V. 9. № 2. P. 3064-3076.

Авторы публикации

Качанов Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и энергосбережения Орловского государственного технического университета имени И.С. Тургенева.

Коренков Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения, Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева.

Ревков Артем Александрович – учебный мастер Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева.

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет.

Воркунов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gatiyatov IZ, Sabitov LS. Methods and installations for monitoring of supports made of tubular rods used in power construction when exposed to static and dynamic loads. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20:5-6:93-101.
2. Gatiyatov IZ, Sabitov LS. Development of the procedure and special bench IS-1 for testing the supports of contact networks of electric transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(1-2):152-163.
3. Medvedev IN. Development of technology and equipment for production of sleepers and supports of power transmission lines from modified wood. *Forestry Bulletin*. 2018;22(6):102–109.
4. Timerbaev NF, Safin RG, Ziatdinova DF., et al. Convective drying of dispersed materials prior to thermochemical processing. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):29-37.
5. Galkin VP, Kuryshov GN, Kosarin A.A., et al. Drying of large sawmills and timber. *Forestry Bulletin*. 2018;2(2):59-68.
6. Mohd-Jamil AW, Zairul AR. *Mechanical Properties of Timber Dried Using Radio Frequency–Vacuum System*. In: Pradhan B. (eds) GCEC 2017. GCEC 2017. Lecture Notes in Civil Engineering,. Springer, Singapore. 2017;9:185-192. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_14.
7. Zhao X, Lee C. *Characteristics of radio-frequency/vacuum combined with mechanical press drying of heavy softwood timbers with longitudinal kerf*. *Holzforschung*, 2020;75(1):48–55. doi: 10.1515/hf-2019-0261.
8. Kachanov AN, Korenkov DA. *Selection of wood drying method according to cost criterion*. 11 th International Scientific and Practical Internet Conference Energy and Resource Saving – 21 th Century. 2013. P. 211-213.
9. Boldor DA, Sanders TH, Swartzel KR, et al. Model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying. *J. of Food Process Engineering*. 2005;28:68-87.

10. Markov AB, Yulenets YuP. Mass transfer mechanism in high-intensity drying processes in the presence of internal heat sources. *Theoretical basics of chemical technology*. 2002;36(3):268-274.
11. Komarov VV. Formulations of mathematical models of processes of interaction of electromagnetic waves with dissipative media in microwave heating systems. *Wave process physics and radio engineering systems*. 2010; 13(4):57-63.
12. Younsi R, Kadem S, Lachemet A, et al. Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation. *Thermal Science*. 2015;19(2):693-702. doi: 10.2298/TSCI120309113Y.
13. Goreshev M.A., Kazarin, A.N., Alekseev M.V. *Simulation of heat and mass transfer of wood during heating in the chamber with reduced pressure*. Collection of works of the 16 th International Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists, Tomsk. 2010;3. :172-173.
14. Sinyutin EV, Yulenets YuP. Automated control system for optimal drying of wood in high-frequency electric field. Instruments and systems. *Control, control, diagnostics*. 2008;8:1-7.
15. Safin RR, Khasanshin RR, Safin R.G. Mathematical model of lumber convective drying process in rarefied environment. *Forestry Bulletin*. 2006;4:64-71.
16. Chai Hao-jie, Zhao Jing-Yao, Cai Ying-Chun. An analysis of heating uniformity in wood high-frequency drying. *Wood and Fiber Science*. 2018;50(3):337-345. doi: 10.22382/wfs-2018-032.
17. Kachanov AN, Korenkov DA. Description of electromagnetic field in flat capacitor with high-frequency heating of long dielectric. *The Bulletin of KrasGAU*. 2016;10(121):137-143.
18. Kachanov AN, Korenkov DA. Mathematical model of electromagnetic field distribution in long flat capacitors with wood dielectric. *Industrial energy*. 2016;9:23 -27.
19. JiaX. Radio frequency vacuum drying of timber. Mathematical model and numerical analysis *BioResources*. 2015;10(3):5440-5459.
20. Koumoutsakos A, Avramidis S, Hatzikiriakos S. Radio frequency vacuum drying of wood. I. Mathematical model. *DRYING TECHNOLOGY*. 2001;19(1):65-84. doi: 10.1081/DRT-100001352.
21. Liu HH, Yang L, Cai Y, et al. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying. *BioResources*. 2014;9(2):3064-3076.

Authors of the publication

Aleksandr N. Kachanov – Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Dmitrii A. Korenkov – Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Artem A. Revkov – Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Maksimov V. Viktor – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vorkunov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

15 ноября 2020 г.

Отредактировано

27 ноября 2020г.

Принято

10 декабря 2020г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

К.А. Сарыев

Научно-производственный центр «Возобновляемые источники энергии»

Государственного энергетического института Туркменистана,

г. Мары, Туркменистан

kakageldisaryyev@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Изучая комплексные вопросы связанные с обеспечением потребителей, находящихся вдали от центральной системы электроснабжения экологически безопасным возобновляемым источником энергии, т. е. преобразованием энергии ветра в электрическую и бесперебойной подачей электроэнергии потребителям. В этой сфере одним из сложных вопросов является определение ресурсов ветровой энергии в районе, где планируется установка ветряной электростанций.

В статье рассматривается вопрос по определению ветроэнергетических ресурсов в Туркменистане. Используя базы данные полученные по метеостанциям в течении нескольких лет, выполняются расчеты ветроэнергетических ресурсов по регионам. Это позволит оперативно и подробно анализировать ветроэнергетический потенциал в той или иной области для проведения оценки выбора мощности проектируемого ветровых установок, целью обеспечения устойчивого развития региона и надёжностью электроснабжения.

МЕТОДЫ. Для оценки ветроэнергетических ресурсов в районе необходимо определить, среднюю скорость ветра в год. В данной научной работе были использованы полученные среднегодовые скорости ветра из метеорологических станций установленные в различных областях Туркменистана. Эти данные были сопоставлены с фактическими данными полученными из ветроэлектростанции мощностью 2 кВт, установленной на научно-исследовательской площадке Государственного энергетического института Туркменистана, и построены соответствующие графики. Результаты полученных данных можно использовать для оптимального выбора мест установки ветряной электростанций и оценки ветроэнергетических ресурсов данного региона. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В результате проведенных расчетов были определены запасы энергии ветра в регионе и для областей Туркменистана, а также определены оптимальные местоположения ветряных электростанций. Используя технические характеристики ветряной электростанции мощностью 2кВт, определена среднегодовая выработка электроэнергии, вырабатываемая ветроэлектростанцией различной мощности.

При правильном определении ветроэнергетического потенциала, имеется возможность решить энергетические, экономические, экологические и социальные вопросы страны. А также возникает возможность для смягчения изменения климата на основе ветроэнергетических установок, и их ресурсы, экологические выгоды, цели и задачи на научно методических основах в области ветроэнергетики для реализации государственных программ по энергосбережению в Туркменистане и энергообеспечению региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе выполненной научной работы определены ветроэнергетические ресурсы и технические потенциалы ветряной электростанций на территории Туркменистана, а также создана база данных для составления ветроэнергетического кадастра.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, чистая энергия, энергетическая революция, альтернативная энергия, увеличение спроса на энергию, истощение запасов

Для цитирования: Сарыев К.А. Определение ветроэнергетических ресурсов в Туркменистане // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 143-154. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-143-154.

DETERMINING WIND ENERGY RESOURCES IN TURKMENISTAN

K.A. Saryyev

State energy institute of Turkmenistan scientific–production
center on «Renewable energy resources»,

Mary, Turkmenistan

kakageldisaryyev@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* Studying the complex issues associated with providing consumers who are away from the central power supply system with environmentally safe renewable energy source, i.e. conversion of wind energy into electrical energy and uninterrupted supply of electricity to consumers. In this area, one of the complex issues is to determine the wind energy resources in the area where it is planned to install a wind farm.

The article deals with the determination of wind energy resources in Turkmenistan. Using databases obtained from meteorological stations over several years, calculations of wind energy resources by region are carried out. This will quickly and in detail analyze the wind energy potential in a particular area to assess the choice of capacity of the projected wind turbines, with the aim of ensuring sustainable development of the region and the reliability of electricity supply.

METHODS. In order to estimate the wind energy resources in the area it is necessary to determine the average wind speed per year. In this research work the average annual wind speeds obtained from meteorological stations installed in different regions of Turkmenistan were used. These data were compared with the actual data obtained from the 2 kW wind power plant installed at the research site of the State Energy institute of Turkmenistan and the relevant graphs were built. The results of the obtained data can be used for optimal selection of wind power plant locations and assessment of wind energy resources of the region. **RESULTS.** As a result of the calculations, wind energy reserves in the region and for the regions of Turkmenistan were determined, as well as the optimal locations of wind farms. Using the technical characteristics of a 2kW wind power plant, the average annual electricity output of a wind power plant of different capacity is determined.

With the correct definition of wind energy potential, there is an opportunity to solve energy, economic, environmental and social issues of the country. And also there is an opportunity to mitigate climate change on the basis of wind energy installations, and their resources, environmental benefits, goals and objectives on the scientific methodological basis in the field of wind energy for implementation of state programs for energy conservation in Turkmenistan and energy supply of the region.

CONCLUSIONS. On the basis of the carried out scientific work the wind energy resources and technical potentials of wind power plants in the territory of Turkmenistan were determined and the database for compiling the wind energy cadastre was created.

Keywords: renewable energy sources, clean energy, energy revolution, alternative energy, increasing energy demand, depletion of reserves.

For citation: Saryyev KA. Determining wind energy resources in Turkmenistan. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):143-154. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-143-154.

Введение. Актуальность проблемы

Туркменистан – государство в Центральной Азии, расположен между 35° 08' и 42° 48' северной широты и 52° 27' и 66° 41' восточной долготы, севернее гора Копетдага, между Каспийским морем на западе и рекой Амударья на востоке. Протяженность с запада на восток - 1110 км, с юга на север - 650 км. Площадь государства - 491,2 тыс. кв. км. На севере он граничит с Казахстаном и на севере и юго-востоке Узбекистаном, на юге - с Ираном и Афганистаном.

В административном отношении Туркменистан подразделяется на пять велаятов (областей) - Дашаогуз, Лебап, Мары, Ахал и Балкан; 57 этрапов (районов), 25 городов и 77 поселков городского типа. Средняя плотность населения по стране составляет 11,5 человек на 1 кв. км. Большая часть населения (54,0%) проживает в сельской местности. Доля городского населения равна 46,0%.

В своих выступлениях Президент Туркменистана Гурбангулы Бердымухамедов

неоднократно подчеркивает о рациональном использовании топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), представляющую собой одну из глобальных мировых проблем, успешное ее решение имеет определяющее значение не только для дальнейшего развития мирового сообщества, но и для сохранения среды его обитания – биосферы. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение новых энергосберегающих технологий, использующих нетрадиционные, т.е. возобновляемые источники энергии.

Уважаемый Президент Туркменистана Гурбангулы Бердымухамедов 4-го декабря 2020-го года принял «Национальную стратегию развития возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 года» указом №2007. В национальной стратегии предусматривается разработки для улучшения ситуации и развития отрасли, а также для достижения целей Парижского соглашения об устойчивом развитии и изменение климата [1-3].

В настоящее время страна ориентирована на использование возобновляемых источников энергии. Изучение возможностей производства электроэнергии на основе использования возобновляемых источников энергии было предусмотрено Концепцией и проводилось в период с 2013 по 2020 годы.

По результатам исследований, проведенных в 2020 году, были сосредоточены на эффективном использовании возобновляемых источников энергии, повышении энергоэффективности, обеспечении энергетической безопасности Туркменистана, внедрении энергосберегающих инновационных технологий в различных секторах национальной экономики и содействии их внедрению. В данное время разработан проект Закона Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии», а также разрабатываются соответствующие нормативные правовые акты.

Целями и приоритетами страны в области изменения климата на 2030 год являются: сокращение количества энергии, потребляемой и производимой CO_2 в единице валового внутреннего продукта. Цель на 2030 год, которая зависит от выполнения дополнительных условий, остановить рост парниковых газов и по возможности, замедлить рост в этой сфере.

Общие мировые принципы включают в себя повышенное потребление энергии, в первую очередь, потребления электрической энергии, риск истощения традиционных ископаемых видов топлива, и их текущее потребление. Возникающая глобальная проблема от эффекта антропогенного воздействия на природу возникает необходимость развития использования возобновляемых источников энергии и по сути делает его практически не имеющим аналогов. Кроме того, на развитие возобновляемых источников энергии влияют такие факторы, как сокращение затрат на возобновляемые источники энергии, улучшение качества воздуха, универсализация доступности энергии, повышение энергетической безопасности, социально-экономические выгоды. Возобновляемые источники энергии стремительно развиваются во всем мире. Прогресс в мире от использования возобновляемых источников энергии по-прежнему сосредоточен в энергетическом секторе, но в то же время наблюдается прогресс в области транспорта, теплоснабжения и холодоснабжения, т.к. солнечные коллекторы имеют больше КПД чем у солнечных панелей [3].

Проектные работы, направленные на строительство ветряных электростанций различной мощности, а также на производство и использование энергии ветра, требуют ответственного подхода со стороны руководителей проекта. В зависимости от условия местоположения ветряной электростанции, определяется возможность бесперебойного снабжения станции источниками энергии ветра и измерением скорости ветра. Таким образом, при небольшом увеличении средней скорости ветра можно значительно увеличить количество производимой энергии. Именно этот показатель (средняя скорость ветра) оказывает наибольшее влияние на финансовую и экономическую эффективность проекта.

Около 40% территории Туркменистана считается выгодным для использования энергии ветра. Использовать энергию ветра удобнее в северо-западных районах, где средняя скорость ветра в течение года превышает 4 м/с. На северных берегах Каспийского моря удельный воздушный поток высок и составляет 110-135 Вт/м². Потенциал энергии ветра считается очень высоким в направлении Балкан-Копетдаг, и его значение также составляет 150 Вт/м². Удельная энергия ветра между центральными областями и северной границей составляет не более 100 Вт/м². В целом, ветровой потенциал составил 5,5 млрд. т, у.т. [1,3].

В 2019 году производство энергии от возобновляемых источников энергии достигло 7182 ТВт·ч/час, что составляет 27% от общего производства энергии в мире [4].

Ветровая энергия - наиболее дешевый ресурс из возобновляемых источников. В местах с хорошими ветровыми условиями она успешно конкурирует с традиционными топливными и атомными электро-станциями. В отдельных странах (Германия, Дания,

Испания, Индия и отчасти США) она превратилась в самостоятельную отрасль. Все проекты по производству ветровой энергии делятся на два вида, исходя из расположения ветрогенерирующих турбин: оффшорные и материковые. Если материковые ветроустановки расположены на суше, то оффшорные ветряные фермы занимают место в море, используя все преимущества открытого и удаленного пространства.

Исходя из вышеизложенного, выбор площадок для установки ветровых электростанций и оценки ресурсов энергии ветра на территории Туркменистане прежде всего необходимо решить некоторые важные вопросы связанной с проектированием. Для решения этой важной задачи необходимо определить среднегодовые скорости ветра (на разных высотах), годовые и суточные направления ветра, повторения скорости ветра, а также минимальной и максимальной скорости ветра планирующем районе, в котором будет осуществляться проект.

Распределение удельной мощности ветрового потока на территории Туркменистана

Для фонового районирования равнинных территорий по удельной мощности ветрового потока используются данные метеостанций, расположенных в открытой местности на плоских или выпуклых формах рельефа (классы открытости по Милевскому - 6б и выше). В соответствии с этим принципом для районирования Туркменистана было отобрано около 72 метеостанций и выведены районы, соответствующие следующим шести диапазонам удельной мощности ветра, Вт/м², на высоте 10 м: 1) <75, 2) 75-125, 3) 125-250, 4) 250-500, 5) 500-1000, 6) 1000-1500. Составление карты ветроэнергетического потенциала позволяет определить удельную ветровую энергию на ровной открытой местности. Если же ставить целью размещение ветроэлектрических установок в энергетически более благоприятных условиях, например, на верхних частях склона, то следует ввести поправки, учитывающие форму рельефа местности [5-7].

Валовый потенциал ветровой энергии

Исходя из общего определения валового потенциала возобновляемых источников энергии, можно сформулировать следующее определение для ветровой энергии. Валовый (теоретический) потенциал ветровой энергии региона - это среднееголетняя суммарная ветровая энергия, движения воздушных масс над данной территорией в течение одного года, которая доступна для использования.

В отличие от других возобновляемых источников энергии, например, солнечной, в определение валового потенциала ветровой энергии входит условие возможности ее использования, поскольку ветер хотя и занимает огромные объемы в атмосфере Земли над регионом, но практически возможно использовать только малую часть общего ресурса ветровой энергии. При этом требуется выработать согласованные принципы возможного использования энергии ветра и оценки соответствующих потенциальных возможностей региона. В современных научных разработках общепринятым принципом является использование энергии ветра на определенной высоте над поверхностью Земли [7].

Одним из основных видов альтернативных источников энергии является энергия ветра. По мнению мировых ученых, общее потенциальное количество источников энергии ветра варьируется в зависимости от их воздействия на все шесть континентов. Общий объем энергии ветра, доступной для технического использования, оценивается в 53 000 ТВт·ч в год. [5].

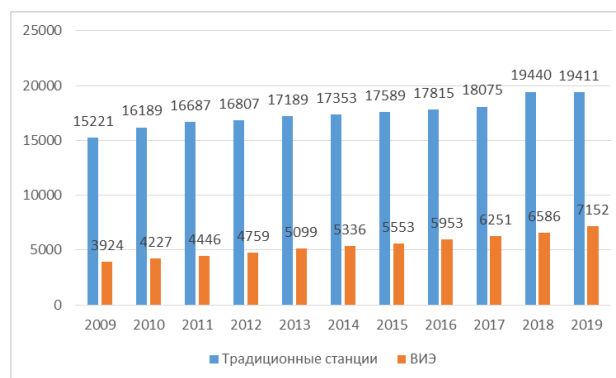


Рис.1.Динамика роста производства энергии, ТВт

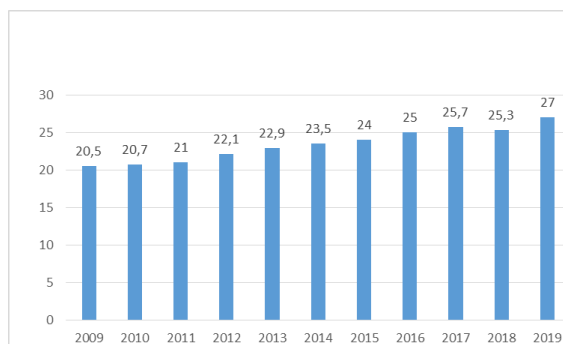


Рис.2. Доля выработанной электрической энергии от общего, %

В 2018 году во всем мире было введено ветровых электростанций с общей мощностью 59 ГВт, что привело к общему увеличению общей установленной мощности ветряных электростанций примерно на 11% по сравнению с показателем на начало 2018 года примерно до 622 ГВт [8-10].

Сегодняшний день с помощью ветроэнергетических установок широко используется для бесперебойного электроснабжения удаленных от центрального энергоснабжения деревень, включая различные энергопотребляющие объекты. Связи с этим в областях, которые соответствуют характеристикам ветра, описанным выше, электричество генерируется ветровыми установками, и используется прямое подключение к центральной сети. Сокращение количества вредных газов, выбрасываемых в окружающую среду на основе использования энергии ветра, также неразрывно связано с требованиями экономии энергоресурсов.

Материалы и методы

В целях обеспечения устойчивого развития в секторах экономики Туркменистана развитие альтернативной энергетики не только диверсифицирует запасы топлива и энергии, но также сократит выбросы углекислого газа и будет способствовать развитию инновационных технологий в промышленных секторах. С целью использования возобновляемых источников энергии, внедрения инновационных технологий, использования в жизненно важных системах современных энергосберегающих оборудования и материалов, принято с постановлением Президента Туркменистана от 21 февраля 2018 года №674 Государственная программа Об энергосбережении на 2018-2024 годы. В этой государственной программе учитывается выбор мест, для внедрения солнечной и ветряной энергетической инфраструктуры в пределах Туркменистана в течение 2018-2021 годы и разработка солнечных и ветряных кадастр, а также оценка солнечных и ветряных энергетических ресурсов. Также с постановлением Президента Туркменистана от 12 апреля 2019 года № 1207 в рамках принятой концепции о развитии «Алтын-Асырского Туркменского озера на 2019-2025 годы» (первый этап 2019-2022 гг.; Второй этап 2022-2025- гг.). В рамках принятой концепции в первом этапе планируется строительство солнечной и ветряной электростанции мощностью 10 МВт, с целью защиты окружающей среды и внедрения экологически чистых «зеленых» технологий в стране [1,10].

В связи с этим для проведения необходимых расчетов в местностях где планируется строительство ветряных электростанций, возникает необходимость расширенных и точных информации для оценки ресурсов энергии ветра. Основательное изучение климатических особенностей в выбранном районе для преобразования ветряной энергии в электрическую остается главной задачей. Для этого ограничиваться полученной информацией от центральной метеорологических станций полученных минимум в течение года в регионах на разных высотах где планируется строительство электростанций недостаточно, в этом случае рекомендуется воспользоваться базой информации, спутника НАСА. Такие характеристики являются самыми важными задачами ветроэнергетической кадастре. В научной работе предлагается способ вычисления для оценки ветроэнергетических ресурсов и выбор местности для внедрения ветреную энергетических установок.

Ветроэнергетический кадастр представляет собой совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, позволяющих выявить его энергетическую ценность и определить возможные режимы работы.

Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются:

- 1 – среднегодовая скорость ветра;
- 2 – годовой и суточный ход ветра;

- 3 – повторяемость скоростей, типы и параметры функций распределения скоростей;
- 4 – максимальная скорость ветра;
- 5 – распределение ветровых периодов и периодов энергетических затиший по длительности;
- 6 – удельная мощность и удельная энергия ветра;
- 7 – ветроэнергетические ресурсы района.

Основной характеристикой ветра, которая определяет интенсивность и эффективное использование энергии ветра, является его средняя скорость за определенный период времени (день, ночь, месяц, год).

Валовой (теоретический) потенциал ветровой энергии района – это средние многолетняя суммарная ветровая энергия движения воздушных масс над данной территорией в течение одного года, которая доступна для использования [11-13].

При скоростях ветра ниже минимальной рабочей скорости $V_{\text{мин.р}}$ мощности лопастей не хватает на преодоление сил трения в узлах ВЭУ. В диапазоне скоростей от $V_{\text{мин.р}}$ до расчётной скорости ветра V_p , при которой ВЭУ развивает номинальную мощность N_n , использование энергии ветра осуществляется наиболее полно.

Среднегодовую скорость ветра можно определить по следующей формуле [12-14]:

$$V_{\text{ср.год}} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} V_{\text{мес}}$$

где: $V_{\text{мес}}$ – средняя скорость ветра в месяц.

Вертикальный профиль ветрового потока определяется по формуле

$$V_{h_2} = V_{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m$$

где V_{h_1} – скорость ветра, измеренная на высоте 10 м, м/с; V_{h_2} – скорость ветра на высоте h_2 ; m – показатель степени, 0,2 для Туркменистана, (в РФ–0,2, в США – 0,18)

Повторение скорости ветра является самым важным показателем в характеристике кадастры. Во время проведения проверки показывается на какой скорости ветер и за какое время оно изменяется. Использовать эти характеристики выводятся ветроэнергетические ресурсы также определяются продуктивность использования ветровой энергии и основные энергетические показатели которые определяют их возможность

Средняя оценка скорости ветра полученное за 2015-2020 годы в метеорологической станции города Мары (Таблица 1).

Таблица 1

Средняя оценка скорости ветра полученное за 2015-2020 годы

Годы	По месяцам, м/с												Среднегодовая, м/с
	I	II	III	IV	V	VI	VI I	VIII	IX	X	XI	XII	
2015	3,2	3,7	3,3	3,6	3,4	3,0	4,1	3,2	2,8	3,2	3,3	3,1	3,3
2016	3,3	3,5	3,6	3,4	3,5	4,0	3,6	3,4	3,1	2,6	2,8	3,4	3,4
2017	3,1	3,5	3,6	4,0	3,4	3,9	3,9	3,2	2,7	3,0	2,7	3,1	3,3
2018	3,4	3,5	3,9	3,8	3,5	3,5	3,6	3,2	2,6	2,5	2,9	3,3	3,3
2019	3,8	3,3	3,6	3,7	3,4	2,9	3,5	3,5	3,1	2,0	2,4	2,7	3,2
2020	3,3	3,5	3,7	3,9	3,3	3,0	3,8	3,3	3,0	2,9	2,6	3,2	3,3

Повторение направление ветра за 2004-2018 года по метеорологическому станцию города Мары (Табл. 2).

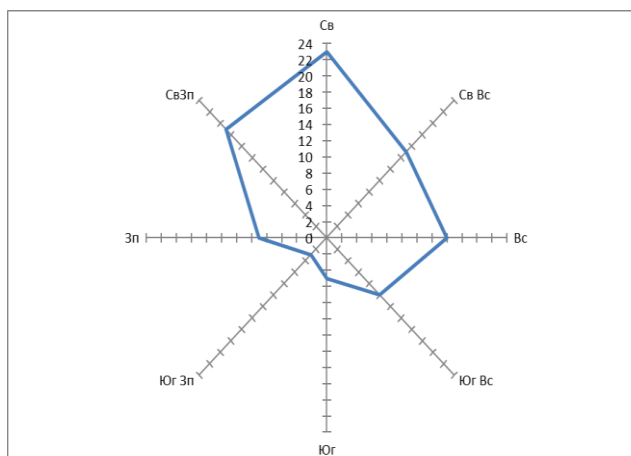


Рис.3. Направление ветра за 2004-2018 годы

Из рис.3 можно сказать, что направление ветра в период 2004-2018 годы в основном северный, северо-восточный.

При анализе возможностей использования энергии ветра наряду с рассмотренными выше данными о средних скоростях ветра и закономерностях повторяемости скоростей большое значение имеют данные возможной длительности периодов работы ВЭУ и периодов простоя (энергетических затиший).

Под рабочим периодом T_p понимается период времени, в течение которого скорость ветра больше минимальной рабочей скорости $V_{\min.p} \approx 3 \text{ м/с}$, но меньше максимальной рабочей скорости $V_{\max.p}$, определяемой из условия обеспечения безопасности работы ВЭУ. Под периодом простоя $T_{пр}$ понимается время, в течение которого скорость ветра меньше $V_{\min.p}$ или больше $V_{\max.p}$. [14-15].

$$\sum_{t=1}^{n_1} T_p + \sum_{t=1}^{n_2} T_{пр} + \sum_{t=1}^{n_3} T_{пр} = T$$

где n_1 – общее число рабочих периодов за год; n_2 и n_3 – число периодов простоя соответственно при скорости ветра меньше $V_{\min.p}$ и больше $V_{\max.p}$; T – число часов в году – 8760.

Для выполнения запланированного в Государственной программе проектных работ, на основе выше приведенных информации проводились относительные расчёты. На метеорологической станции марки «Davis Vantage Pro2 Pl» установленном в самостоятельно энергоснабжающем испытательном доме Государственного энергетического института Туркменистана (ГЭИТ), получены точные величины по интенсивности солнечной радиации, испарение через воды, влажность и температура воздуха, количество и темпы атмосферных осадков, определения направления и скорости ветра. В результате на основании проведенного расчета была определена среднегодовая мощность ветряной электростанции установленной в ГЭИТ мощностью 2 кВт. Также эти технические показатели ветряной электростанции мощностью 2 кВт использовались для оценке запасов ветровой энергии в регионах Туркменистана и при соответствующем месторасположении ветроэнергетических установок.



Рис. 4. Метеорологическая станция марки *Davis Vantage Pro2 Plus* установленная в самостоятельно энергоснабжающем испытательном доме Государственного энергетического института Туркменистана (ГЭИТ)

Среднюю мощность потока ветра для города Мары на 1 м^2 площади можно определить по следующей формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{(\rho \cdot S \cdot V_{\text{ср}}^3)}{2} = \frac{(1,225 \cdot 1 \cdot (3,3)^3)}{2} = 22,01 \text{ Вт}$$

где: ρ - плотность воздуха ($1,225 \text{ кг/м}^3$ при нормальных условиях); S - площадь поперечного сечения потока ветра (площадь поверхности, образованная вращением ветряной электростанции); $V_{\text{ср}}^3$ - средняя скорость ветра в течении года.

Среднегодовая удельная энергия ветрового потока $W_{\text{уд.н}}$ (энергия, протекающая за 1 год через 1 м^2 поперечного сечения ометаемой площади) зависит от повторяемости скоростей ветра, т.е. какую долю годового времени t_i ветер дул со скоростью V_i [15]

$$W_{\text{уд.н}} = \frac{1}{2} \rho T \sum_{i=1}^k t_i \cdot V_i^3$$

где k – число градаций ветра;

Зная среднегодовую скорость ветра, его вертикальный профиль и повторяемость скорости ветра, можно дать энергетическую характеристику ветрового потока в любом районе.

Среднегодовая удельная мощность ветрового поток можно определить по следующему выражению:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{уд}}}{T}$$

А мощность ветроустановки:

$$P_{\text{ВЭУ}} = \eta \xi P_{\text{уд.н}} A_0$$

где η – коэффициент полезного действия, 0,85; ξ – коэффициент ветроиспользования, 0,45; A_0 – ометаемая площадь, $\pi d^2/4$, м^2 .

Исходя из вышеизложенного в рассматриваемой случае среднее количество электроэнергии, вырабатываемой ветряной электростанцией мощностью 2 кВт, зависит от площади поверхности, генерируемой вращательным движением ветра станции ($d=3,3 \text{ м}$), и скорости ветра, а саму площадь поверхности будет равна следующему выражению:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 3,3^2}{4} = 8,55 \text{ м}^2$$

где: d — диаметр лопасти ветроэнергетической установки, м.

Для площади поверхности, образующейся при вращении лопастей в ветряной электростанции мощностью 2 кВт, средняя мощность потока ветра будет определена по следующей формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{(\rho \cdot S \cdot V_{\text{ср}}^3)}{2} = \frac{(1,225 \cdot 8,55 \cdot (3,3)^3)}{2} = 188,2 \text{ Вт}$$

Тогда производительность электроэнергии за год ветряной электростанции будет равна следующему значению:

$$W_{\text{ср.год}} = \frac{(24 \cdot 365 \cdot P_{\text{ср}})}{1000} = \frac{(24 \cdot 365 \cdot 188,2)}{1000} = 1648,63 \text{ кВт} \times \text{час} / \text{год}$$

Если ссылаться информации с интернета, тогда за 2019 год было 326 ветряных дней, а безветренных дней равна 39.

Таблица 2

Технические характеристики ветроэлектростанции мощностью 2 кВт

№	Наименование технической спецификации	Цена и единица измерения
1	Номинальная мощность	2000 Вт
2	Номинальное напряжение	96 В
3	Диаметр лопастей	3,3 м
4	Начальная скорость вращения лопастей	3 м/с
5	Номинальная скорость вращения лопастей	10 м/с
6	Ограниченная скорость вращения лопастей	45 м/с
7	Вес устройства	48 кг
8	Количество лопастей	3
9	Рабочая температура	от -40° С до +80° С



Рис.5. Ветроэлектростанция мощностью 2 кВт установленная на территории ГЭИТ

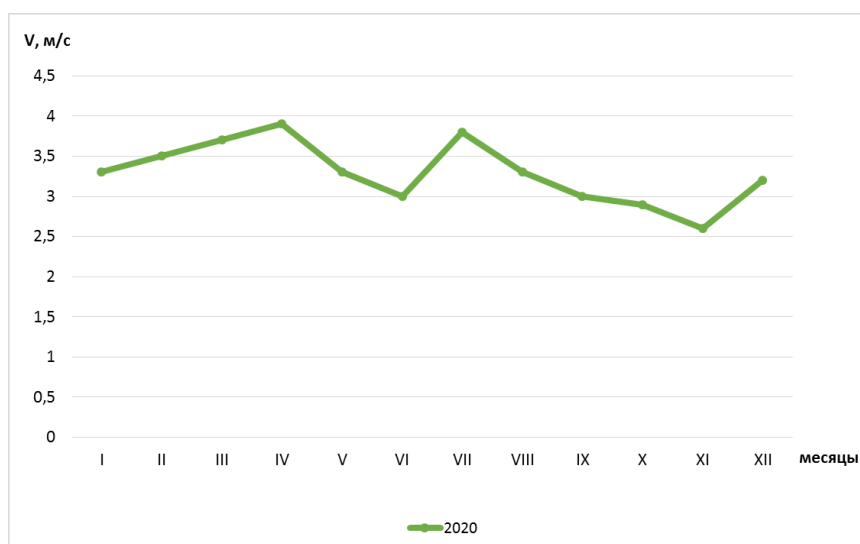


Рис. 6. Среднегодовая скорость ветра города Мары

Для определения среднегодовой скорости ветра в областях Туркменистана использовались данные с метеорологических станций собранные по каждой области за 2004-2018 годы.

На основе этих данных был составлен сравнительный график определяющий средние скорости ветра за месяц, а также была определена средняя скорость ветра за год в областях Туркменистана (рис.7). Полученные значения были использованы в технических показателях ветроэлектростанции с мощностью 2 кВт установленной на территории Государственного энергетического института Туркменистана, что позволило определить оптимальное расположение ветроэлектростанций в других регионах.

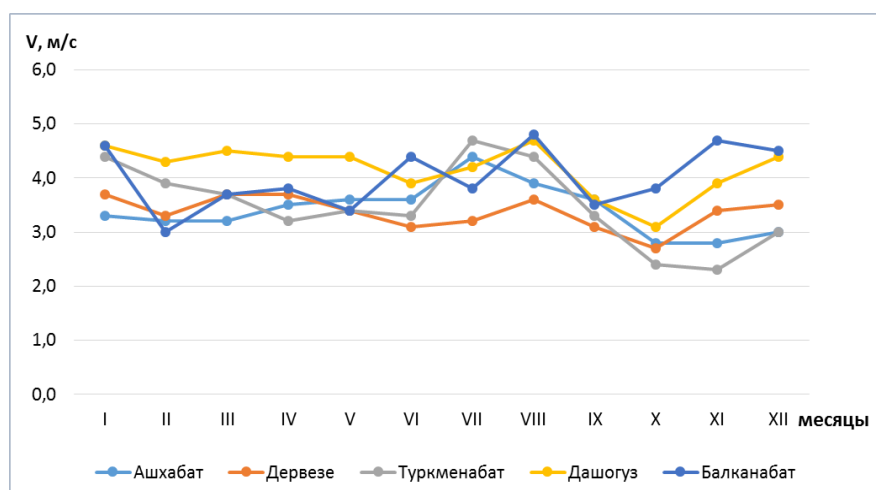


Рис.7.. Среднегодовая скорость ветра по областям Туркменистана

Обсуждение результатов

План реализации вышеупомянутых государственных программ включает оценку запасов ветровой энергии страны и выбор площадок для ветряных электростанций. В этой научной статье полученные с метеорологических станций оценки ветровой энергии, созданных в Туркменистане, сравниваются с данными, полученными из интернета и сделанными на метеостанции, созданной в институте.

Полученные результаты научной работы может быть использована при оценке запасов ветроэнергетики для регионов Туркменистана и при определении местоположения ветряных электростанций.

Данные о средней скорости ветра с метеостанции в регионах Туркменистана за 2004-2018 годы

№	Области Туркменистана	Расположение метеорологической станции в регионах	Географические широты, ° (в градусах)		Среднегодовая скорость ветра, м/с	Среднегодовая выработка электроэнергии ветряной электростанции с мощностью 2 кВт, кВт·ч/г
			Северная широта	Восточная долгота		
1.	Ашхабат	Ашхабат	37,9	58,3	3,4	1803,07
2.	Ахал	Дервезе	40.10	58.24	3,4	1803,07
3.	Мары	Мары	37,6	61,8	3,3	1648,63
4.	Лебап	Туркменабат	39,1	63,6	3,8	2517,25
5.	Дашогуз	Дашогуз	41,8	59,8	4,4	3907,82
6.	Балкан	Балканабат	39,5	54,4	4,4	3907,82

Заключение

Данные, полученные в результате расчетов, могут быть использованы для оценки запасов энергии ветра в регионе и для областей Туркменистана, а также для определения местоположения ветряных электростанций.

- Используя технические характеристики ветряной электростанции мощностью 2кВт, было рассчитано среднегодовая мощность электроэнергии, выработанной ветроэлектростанцией различной мощности.
- На основе данных метеорологических станций в регионах разработаны сравнительные характеристики средней скорости ветра и составлен график направлений ветра.
- Определены среднегодовые значения скорости ветра для города Мары.

Литература

1. Государственная программа утвержденная Указом Президента Туркменистана. А.:2018, 2019.
2. Бабаев А.Г. Физическая география Туркменистана. 2014.
3. Джумаев. А., Султанов Х. Основы энергосбережения. А.: Наука, 2018.
4. Key word energy statistics, 2009 // International Energy Agency.
5. Каргиев В.М., и др. Ветроэнергетика руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. М.: 2001.
6. Доступно по: <https://rp5.ru> website information.
7. Dorjiev S.S, Bazarova E.G, Pimenov S.V, et al. Development of wind power installations with the accelerator of an air stream for areas with a low speed of wind/ S.S. Dorjiev et al // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1111. P.012053.
8. Wind Energy Projects in Cold Climate (Edition 2011). Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research, Development and Deployment on Wind Energy Conversion Systems. 2012. Available at : [http://ieawind.org/index_page_postings/June 7 posts/task 19 coldclimate rapproved05.12.pdf](http://ieawind.org/index_page_postings/June%207%20posts/task%2019%20coldclimate%20approved05.12.pdf). Accessed to: 12 Apr 2019.
9. Erma A.R., Kamani P.L., Kapadia R.R. A review on grid power quality improvement in wind energy system using STATCOM with BESS. Journal Emerg. Technol. Innov. Res. 2 (1) (2015)
10. Renewable Capacity Statistics. 2016. Available at : [https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA RE Capacity Statistics 016.pdf](https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_RE_Capacity_Statistics_016.pdf). Accessed to: 17 Apr 2019.
11. O'Sullivan J. Two utilities opt out of cape wind., January 2015. Available at: <http://www.bostonglobe.com/metro/2015/01/06/major-setback-for-cape-wind>. Accessed to: 06 Apr. 2019.
12. Насырова Е.В., Тимербаев Н.Ф., Леухина О.В., др. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан. Научно-практический рецензируемый журнал «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ». 2019. Т. 21, № 6. С. 39-50
13. Саликеева С.Н., Галеева Ф.Т. Обзор методов получения альтернативной энергии. Вестник Казан. технол. ун-та. 2012. Т.15. №8. С.57-59.
14. Кузнецова Е.В., Пуганова П.А. Экономическая целесообразность использования ветровой энергии // Наука, образование, инновации. 2016. С. 14-16.

15. Impact of Wind Power Generation in Ireland on the Operation of Conventional Plant and the Economic Implications. 2004. Available at: <https://docs.wind-watch.org/EirGrid-WindImpact-Main.pdf>. Accessed to :18 May 2019.

Автор публикаций

Сарыев Какагелди Атаджанович – канд. техн. наук, директор НПЦ «Возобновляемые источники энергии», Государственный энергетический институт Туркменистана (ГЭИТ).

References

1. State program approved by the Decree of the President of Turkmenistan, A. :2018, 2019.
2. Babaev A.G. *Physical geography of Turkmenistan*, Toolkit A.: 2014.
3. Dzhumayev A, Sultanov H. *Fundamentals of energy saving, Science*, Ashgabat. 2018.
4. Key word energy statistics, 2009. *International Energy Agency*.
5. Kargiev VM, et al. *Wind power engineering guidelines for the use of wind turbines of small and medium power*. M.: 2001.
6. Available at: <https://rp5.ru> website information.
7. Dorjiev SS, Bazarova EG, Pimenov SV, et al. Development of wind power installations with the accelerator of an air stream for areas with a low speed of wind. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1111:012053.
8. Wind Energy Projects in Cold Climate (Edition 2011). *Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research, Development and Deployment on Wind Energy Conversion Systems*. 2012. Available at: http://ieawind.org/index_page_postings/June_7_posts/task_19_coldclimate_rapproved05.12.pdf. Accessed to: 12 Apr 2019.
9. Erma AR, Kamani PL, Kapadia RR. A review on grid power quality improvement in wind energy system using STATCOM with BESS. *Journal Emerg. Technol. Innov. Res.* 2015;2(1)
10. *Renewable Capacity Statistics*. 2016. Available at : https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_RE_Capacity_Statistics_016.pdf. Accessed to: 17 Apr 2019.
11. O'Sullivan J. *Two utilities opt out of cape wind*. January 2015. Available at: <http://www.bostonglobe.com/metro/2015/01/06/major-setback-for-cape-wind>. Accessed to: 06 Apr. 2019.
11. Nasyrova EV, Timerbaev NF, Leukhina OV, et al. Analysis of wind monitoring data in the Republic of Tatarstan Scientific and practical peer-reviewed. *ENERGY PROBLEMS*. 2019;21(6):39-50.
12. Salikeeva SN, Galeeva FT. Review of methods for obtaining alternative energy. *Bulletin KSPEU*, 2012;15(8):57-59.
13. Kuznetsova EV, Puganova P.A. Economic feasibility of using wind energy // *Science, education, innovations*. 2016. S. 14-16.
14. Impact of Wind Power Generation in Ireland on the Operation of Conventional Plant and the Economic Implications. 2004. Available at: <https://docs.wind-watch.org/EirGrid-WindImpact-Main.pdf>. Accessed to:18 May 2019.

Authors of the publication

Kakageldi A. Saryyev – State energy institute of Turkmenistan scientific–production center on «Renewable energy resources», Mary, Turkmenistan.

Получено

17 ноября 2020г.

Отредактировано

23 ноября 2020г.

Принято

18 декабря 2020г.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕАЭРИРУЮЩЕГО КОНДЕНСАТОСБОРНИКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПТ-60-130/13

А.Д. Водениктов, Н.Д. Чичирова

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5984-9944>, vodhan@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы роста концентрации растворенного кислорода в основном конденсате паровых турбин. Оценить возможность интенсификации вакуумной термической деаэрации в конденсационной установке паровой турбины ПТ-60-130/13 ЛМЗ с целью снижения скорости коррозии конденсатно-питательного тракта. Провести испытания выносного деаэрационного конденсатосборника, обеспечивающего удаление кислорода за счет тепла рециркуляции и постояннодействующих дренажей. Определить динамику изменения концентрации растворенного кислорода в основном конденсате после включения устройства в работу. МЕТОДЫ. Для оценки качества работы выносного деаэрационного конденсатосборника проведены испытания по определению концентрации растворенного кислорода на напоре конденсатных насосов при различных расходах греющей среды. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье приводятся результаты деаэрационных испытаний вышеописанного устройства. Приводится зависимость остаточной концентрации растворенного кислорода от расхода греющей среды. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование выносного деаэрационного конденсатосборника позволяет добиться концентрации кислорода ниже норм, установленных правилами технической эксплуатации и обеспечить поддержание нормального водно-химического режима. Во время проведения испытаний, кислородосодержание уменьшилось на 70% и достигло величины 8 мкг/дм³. Деаэрационный конденсатосборник рассмотренного типа может быть рекомендован к эксплуатации, особенно во время пусковых режимов и режимах с низкой тепловой нагрузкой на охлаждающую поверхность конденсатора.

Ключевые слова: Конденсатор, система регенерации, конденсат, деаэрация, кислород, паровая турбина, коррозия.

Для цитирования: Водениктов А.Д., Чичирова Н.Д. Исследование работы деаэрирующего конденсатосборника паровой турбины // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 155-163. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-155-163.

INVESTIGATING THE DEARATING HOTWELL WORKING REGIMES OF THE PT-60-130/13 STEAM TURBINE

AD Vodeniktov, ND Chichirova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vodhan@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-9944> vodhan@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the problems of the increasing dissolved oxygen concentration in feedwater, especially after the condensate pumps. To estimate the opportunity of the vacuum thermic deaeration intensification inside the PT-60-130/13 LMZ steam turbine condenser to reduce the feedwater system rate of corrosion. Perform a thermal test of the external deaerating hotwell, which provides reducing dissolved oxygen concentration by the hot drains and recirculating feedwater. To evaluate the march of the dissolved oxygen concentration in feedwater after the inclusion of the deaerating hotwell. METHODS. The thermal test of the external deaerating hotwell was chosen for evaluating water deaeration.

RESULTS. In this paper, the results of the thermal tests are given. The relation of the dissolved oxygen concentration from heating fluid flow is also presented. **CONCLUSION.** . The use of the external deaerating hotwell allows achieving dissolved oxygen concentration below the norms established by the code of operation for electrical power plants and grids to ensure the maintenance of an acceptable water-chemical regime of the feedwater. During the tests, the dissolved oxygen concentration decreased by 70% and reached a value of 8 mcg/dm³. The deaerating hotwell of the considered type can be recommended for the operation, especially during start-up modes and modes with the low thermal load on the condenser cooling surface.

Keywords: Condenser, feed water, steam turbine, oxygen, deaeration, corrosion.

For citation: Vodenikov AD, Chichirova ND. Investigating the deaerating hotwell working regimes of the pt-60-130/13 steam turbine. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):155-163. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-155-163.

Введение

Экономичность и надежность производства электрической и тепловой энергии на тепловых электростанциях (ТЭС) зависят от множества факторов [1,2]. Не последнюю роль в этой задаче является совершенство основного и вспомогательного оборудования ТЭС. Особое внимание уделяется конденсаторам паровых турбин, служащих для фазового перехода отработавшего в турбине пара и, зачастую, определяющих экономичность турбины [3,4]. Применяемые на сегодняшний день регенеративные конденсаторы, как правило, гарантируют низкую концентрацию растворенного кислорода в основном конденсате паровой турбины. Для новых паротурбинных установок также разрабатываются алгоритмы и программные комплексы, позволяющие непрерывно контролировать состояние конденсационной установки и её узлов [5,6], а также определять наиболее оптимальные условия эксплуатации [7]. Однако, для длительно работающих турбин с неудовлетворительной плотностью вакуумной системы и повышенной величиной присосов, зачастую не удается достичь требуемого качества основного конденсата. Особенно остро эта проблема стоит для теплофикационных паровых турбин, традиционно работающих с низким пропуском пара в конденсатор. Уменьшение удельной паровой нагрузки на теплообменную поверхность ведет к ухудшению условий деаэрации основного конденсата и стремительному росту концентрации растворенного кислорода в основном конденсате [8]. Как известно, концентрация кислорода в основном конденсате не влияет на экономичность работы паровой турбины или энергоблока. Однако, продолжительная работа конденсатно-питательного тракта с обогащенной кислородом водой может ускорить выход из строя как основного, так и вспомогательного оборудования [9]. Угроза финансовых потерь от внеплановых простоев заставляет персонал электростанций искать пути обеспечения надлежащей деаэрирующей способности конденсатора на всем диапазоне нагрузок [10].

На сегодняшний день отсутствуют инновационные предложения по увеличению деаэрирующей способности конденсатора. Современные подходы базируются на концепциях, предложенных в 60-х годах прошлого века. Способность конденсатора деаэрировать кислород определяется еще на этапе проектирования. Так, в первой половине XX века применялись нерегенеративные конденсаторы, имеющие компоновку трубных пучков с высоким паровым сопротивлением без регенеративных проходов пара к конденсату. Переход к регенеративным конденсаторам позволил увеличить площадь и время контакта между стекающим с трубок конденсатом и отработавшим паром. Это привело к снижению переохлаждения конденсата и, как следствие, к снижению концентрации растворенного кислорода. Стоит отметить, что помимо улучшения качества основного конденсата, рациональная компоновка трубных пучков позволяет увеличить мощность паровой турбины [11]. Так, согласно [12], замена модульной компоновки трубных пучков на компоновку типа «*Radiant*» (рис. 1) позволила повысить мощность паровой турбины на 12-14 МВт.

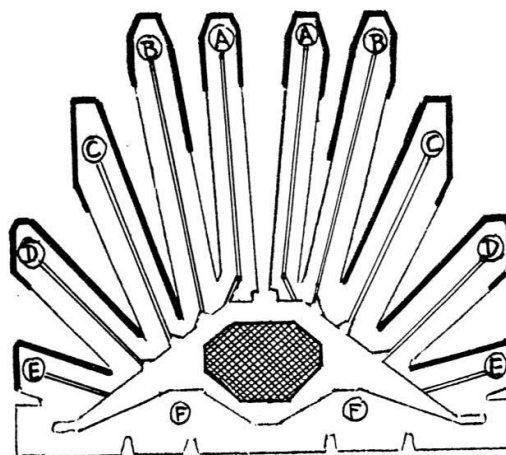


Рис. 1. Пример современной компоновки трубных пучков. Тип «Radiant»

Следующим шагом улучшения деаэрирующей способности можно назвать применение деаэрационных конденсатосборников. В конструкциях конденсаторов отечественных и зарубежных турбин подобное решение применяется более 60 лет. В зависимости от схемы организации потоков основного конденсата и греющей среды, деаэрационные устройства конденсаторов подразделяются на пленочные, насадочные, струйные (при движении воды в паре) и барботажные (при движении пара в воде). Подобные устройства применяются на турбинах К-300-240 ЛМЗ (рис. 2), К-300-240 и К-500-240 ХТГЗ, Т-175/210-130 УТЗ и многих других. Как показал опыт эксплуатации, данные устройства позволяют обеспечить поддержание требуемой концентрации растворенного кислорода в основном конденсате на большинстве рабочих режимов паровой турбина. Результаты серии испытаний, показывающие зависимость остаточного содержания кислорода в конденсате после деаэрационного устройства от удельного расхода пара на деаэрацию, при работе блока в диапазоне 130-300 МВт, абсолютном давлении в конденсаторе 3,7-6,0 кПа и начальной температуре охлаждающей воды 4-18°C, представлены на рис. 3 [8].

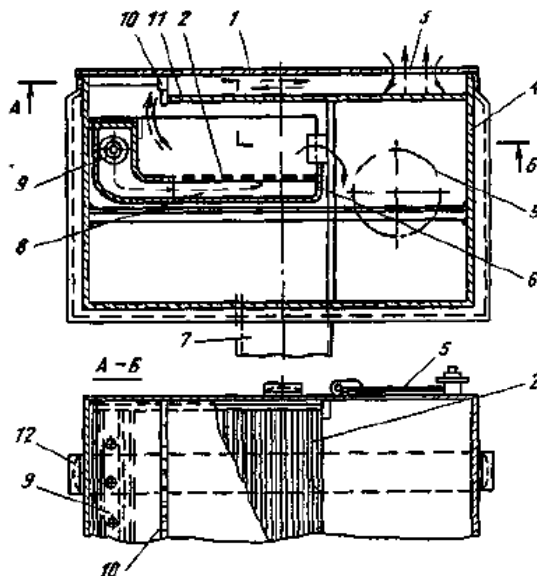


Рис. 2. 1-конденсатор, 2-барботажный лист, 3-подвод конденсата и отвод выпара, 4-корпус конденсатосборника, 5-лаз (люк), 6-перегородки (порог), 7-отвод конденсата к насосам, 8-паровая камера, 9-паровой коллектор, 10-зубчатый порог (распределительный водослив), 11-лист, 12-пояса жесткости.

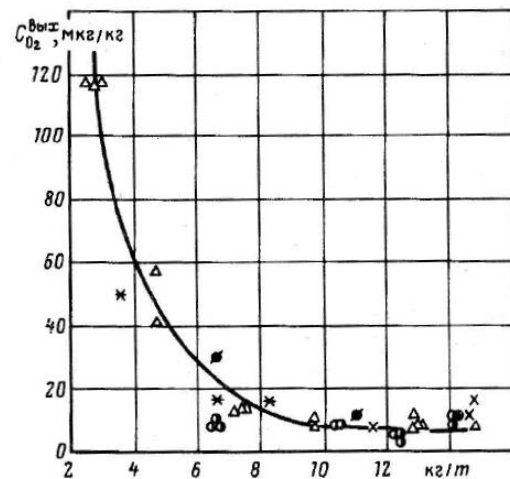


Рис. 3. Зависимость концентрации растворенного кислорода в основном конденсате на выходе из деаэрационного устройства от удельного расхода пара на барботаж (график построен по данным серии экспериментов)

Однако, для самых многочисленных теплофикационных турбин – ПТ-60-130/13 ЛМЗ и Т-100/110-130 УТЗ, деаэрационные устройства конденсаторов не получили широкого распространения. Существующие улучшения для конденсаторов данных турбин направлены, как правило, на интенсификацию процессов теплообмена между трубками и отработавшим паром [13]. Данное обстоятельство подталкивает эксплуатантов к разработке единичных нововведений и использованию таких решений, как выносные деаэрирующие конденсатосборники [14].

Материалы и методы испытания деаэрационного конденсатосборника

Модернизация тепловой схемы с помощью деаэрационного конденсатосборника была выполнена на турбине ПТ-60-130/13 Набережночелнинской ТЭЦ, оснащенной конденсатором 60-КЦС. Схема регенерации низкого давления турбоустановки типовая – включает 4 подогревателя низкого давления (ПНД-1,2,3,4) поверхностного типа, охладитель пара промежуточных уплотнений (ПУ), вакуумный сальниковый подогреватель с эжектором (ПС-50) и холодильники основных эжекторов (А и Б) (рис.4.).

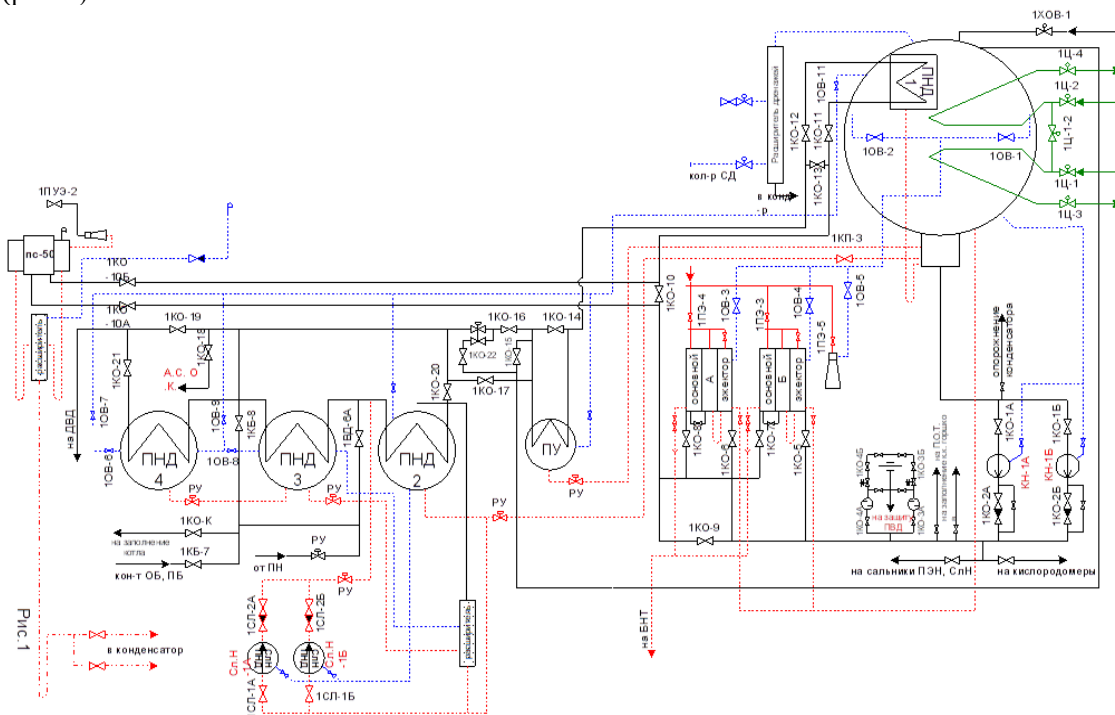


Рис. 4. Тепловая схема системы регенерации паровой турбины ПТ-60-130/13 ЛМЗ.

Слив конденсата греющего пара из ПНД № 4,3,2 каскадный, из ПНД-4 – в ПНД-3,

из ПНД-3 – в ПНД-2. Из ПНД-2 конденсат откачивается двумя сливными насосами (СлН ПНД) в линию основного конденсата за ПНД-2. При пусковом режиме турбины конденсат греющего пара подогревателей низкого давления сливается каскадно в ПНД-2, а затем направляется в конденсатор. Температуры основного конденсата за подогревателями низкого давления, при работе турбины в конденсационном режиме, представлены на рис. 5.

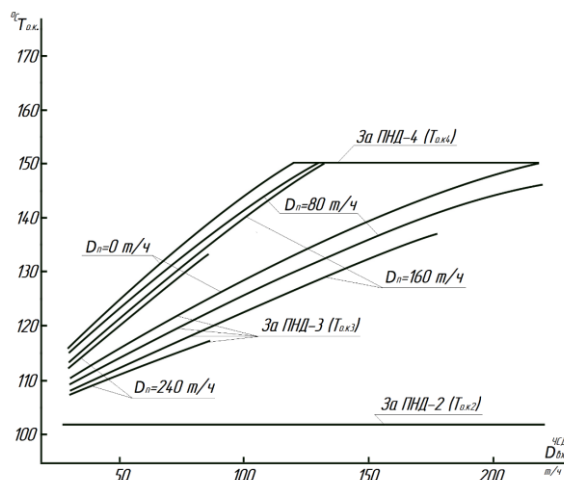


Рис. 5. Диаграмма температур основного конденсата после подогревателей системы регенерации при различных расходах пара через ЧСД

Конденсатор 60-КЦС имеет подвальное поперечное расположение. Выполнен двухходовым, однокорпусным, площадь поверхности охлаждения составляет 3000 м². Номинальный расход пара в конденсатор составляет 160 т/ч. Как показывает практика [15], при эксплуатации турбин, с ростом расхода пара в конденсатор, наблюдается улучшение процесса деаэрации. Проблема нормирования качества турбинного конденсата по содержанию диоксида углерода представлена в работе [16]. Однако, результатов полноценных, всережимных деаэрационных испытаний для данных турбин, описывающих их деаэрирующую способность, в литературе не встречается.

На турбине ПТ-60, в рамках инвестиционной программы, был установлен выносной деаэрационный конденсатосборник, разработанный компанией «Экотех». Данный конденсатосборник предназначен для удаления кислорода из основного конденсата теплофикационных турбин и, тем самым, защиты тракта основного конденсата от коррозии. Насыщение основного конденсата турбины кислородом происходит, как правило, на режимах со значительным отбором пара в сетевые подогреватели и, соответственно, низкой паровой нагрузкой конденсатора. В основе конструкции конденсатосборника заложена двухступенчатая схема деаэрации конденсата, включающая сначала обработку на заглубленном барботажном устройстве, а затем обработку на барботажном листе в тонком слое. Длительный период эксплуатации деаэрирующих конденсатосборников подтвердил высокую надежность двухступенчатой схемы деаэрации, обеспечивающей низкое содержание растворенного кислорода в конденсате при его значительном переохлаждении и переменных режимах работы турбины. Схема конденсатосборника показана на рис. 6.

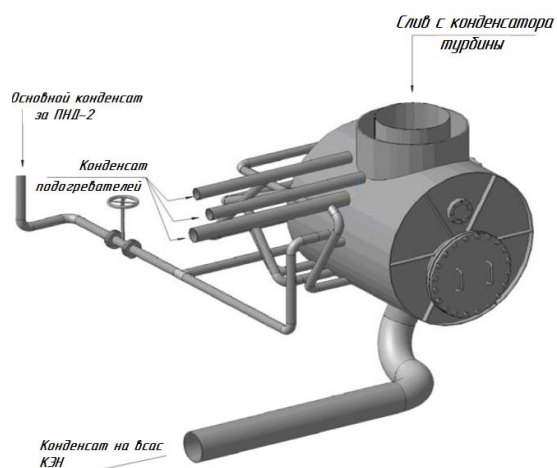


Рис. 6. Схема деаэрационного конденсатосборника

Благодаря заглубленному размещению коллекторов тепловая энергия греющей среды расходуется на нагрев конденсата без сброса неусвоенного пара в паровое пространство конденсатора. При этом конструкция деаэрирующих конденсатосборников исключает возможность запаривания конденсатора (снижения вакуума в конденсаторе турбины) и, соответственно, ограничения выработки электрической мощности. Расход выпара деаэрирующего конденсатосборника зависит от расхода основного конденсата и греющей среды, и не превышает 1 т/ч, что не накладывает существенных ограничений на выработку электроэнергии турбоагрегата.

На сегодняшний день отсутствуют программы испытаний подобных устройств. Основным критерием работоспособности устройства является достижение необходимой концентрации растворенного кислорода на напоре конденсационных насосов.

Результаты испытаний

Программа испытаний установленного конденсатосборника предусматривала доведение концентрации растворенного кислорода до величин, установленных правилами технической эксплуатации. На момент начала испытаний турбина несла нагрузку 56 МВт, концентрация кислорода на напоре конденсатных насосов – 27 мкг/л.

В 11:00 при полностью закрытом регуляторе греющей среды произведена фиксация концентрации растворенного кислорода.

В 11:30 был установлен расход греющей среды 5 т/ч. Началось медленное снижение концентрации растворенного кислорода до 25 мкг/л.

В 12:05 при расходе греющей среды 5,5 т/ч, концентрация растворенного кислорода снизилась до величины 15 мкг/л.

В 12:30 на момент окончания работ, концентрация растворенного кислорода на напоре конденсатных насосов установилась на уровне 8 мкг/л.

График изменения концентрации кислорода в период проведения испытаний представлен на рис. 7.

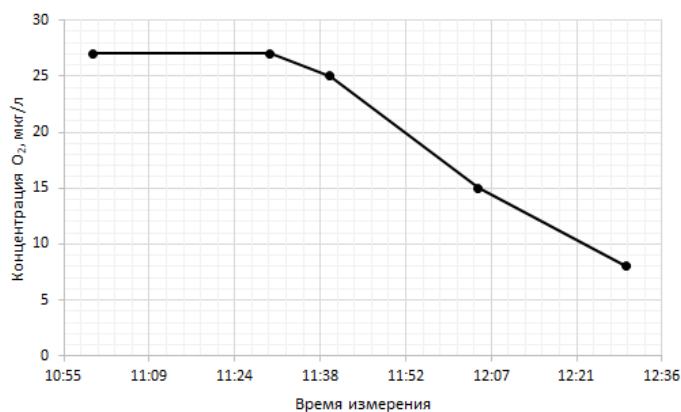


Рис. 7. График изменения концентрации кислорода

Как показывает мониторинг водно-химического режима рассматриваемой турбины, при работе конденсатосборника наблюдается устойчивое поддержание

концентрации растворенного кислорода на уровне 10 мкг/л.

Вышеописанные результаты говорят о работоспособности устройства и его эффективности как вакуумного деаэрата.

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что основная причина повышенного кислородосодержания заключалась, вероятнее всего, в присосах атмосферного воздуха в паровое пространство конденсатора. Низкая концентрация растворенного кислорода после конденсатных насосов свидетельствует об отсутствии значительных присосов под уровень конденсата.

Рассматриваемый конденсатосборник рассчитан на максимальный расход греющей среды 16 т/ч, что при максимальном расходе пара в конденсатор 160 т/ч, дает удельный расход 100 кг греющей среды на 1 тонну основного конденсата (без учета ввода подпиточной воды в конденсатор), что значительно выше, чем в деаэрационном устройстве конденсатора 300-КЦС-1. Это объясняется тем, что теплосодержание конденсата после ПНД-2 значительно ниже, чем теплосодержание перегретого пара из отбора турбины.

Главный недостаток данного устройства – его внешнее расположение. Невозможность встраивания в существующий конденсатосборник делает ограниченным применение данного типа устройств на электростанциях. Так, исследуемый конденсатосборник имеет габариты 1650x1732x1708 мм. Подобные размеры требуют значительного свободного пространства в ячейке между конденсатором и конденсатными насосами.

Также стоит отметить, что увеличение размеров вакуумной системы, путем подключения смешивающего подогревателя, дополнительных трубопроводов и трубопроводной арматуры, ведет к росту потенциальных мест присосов. При работе конденсатосборника, трубопроводы подвода греющей среды будут находиться под избыточным давлением, что исключит возможность попадания атмосферного воздуха в конденсатосборник. Однако бак конденсатосборника и трубопровод отвода деаэрированного конденсата всегда работают под разряжением.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что включение данного конденсатосборника в работу наиболее целесообразно во время пусковых операций, а также при работе турбины с низким пропуском пара в конденсатор. Данная рекомендация подтверждается опытом эксплуатации и деаэрационными испытаниями конденсационных турбин (рис.8). Так, согласно [14], при увеличении расхода пара в конденсатор, величина растворенного кислорода в основном конденсате будет снижаться. Для большинства конденсаторов, качество основного конденсата резко ухудшается при паровой нагрузке, составляющей 50% и менее от номинальной. Также включение устройства может потребоваться при снижении температуры охлаждающей воды и следующим за ним увеличением кислородосодержания [17].

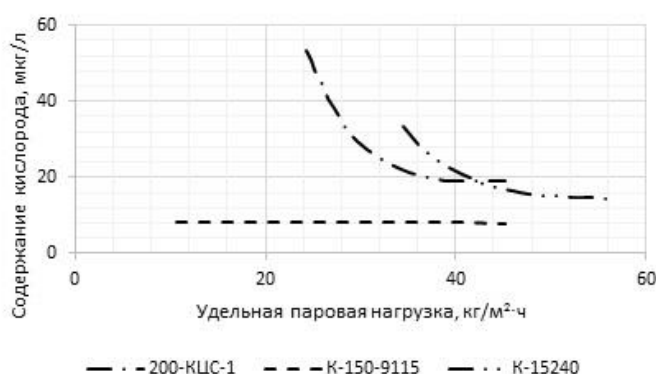


Рис. 8. Зависимость концентрации растворенного кислорода от удельной паровой нагрузки

Изменение работы конденсатора на малых нагрузках можно объяснить ухудшением процесса теплообмена на этих режимах. При неизменности температуры и расхода охлаждающей воды это может быть вызвано несоответствием характеристик конденсатора и воздухоотсасывающего устройства. В результате конденсатор переходит на режим работы с ухудшенным вакуумом. Для компенсации этого несоответствия в объеме конденсатора накапливается дополнительный воздух, который, находясь главным образом в области, близкой к конденсатосборнику насыщает конденсат [8].

Выводы

1. Конструкция выносного деаэрирующего конденсатосборника компании «Экотех» позволяет добиться концентрации растворенного кислорода ниже значений, установленных правилами технической эксплуатации.

2. Данная конструкция, не смотря на свою простоту и эффективность, не лишена недостатков. Громоздкость устройства, ведущая к росту объема вакуумной системы, создает потенциальную опасность увеличения величины присосов воздуха в вакуумную систему.

3. Наиболее целесообразным является включение в работу устройства при низкой удельной паровой нагрузке охлаждающей поверхности конденсатора. Данный режим характерен работе теплофикационной турбины по тепловому графику с закрытой диафрагмой, который, вкупе с высоким расходом добавочной воды в конденсатор, затрудняет получение качественного конденсата в конденсаторе паровой турбины.

Литература

1. Менделеев Д.И., Марьин Г.Е., Ахметшин А.Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник КГЭУ. 2019. №3 (43).
2. Аминов Р.З., Гариевский М.В.. Эффективность работы парогазовых ТЭЦ при переменных электрических нагрузках с учетом износа оборудования // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2018. №7-8.
3. Alabrudzinski S., Markowski M., Trafczynski M., Urbaniec K. The Influence of Fouling Build-up in Condenser Tubes on Power Generated by a Condensing Turbine. Chemical Engineering Transactions. 2016. V. 52. P. 1225-1230.
4. Gap Park Y., Youl Yoon S., Min Seo Y., et al. A study on the optimal arrangement of tube bundle for the performance enhancement of a steam turbine surface condenser, Applied Thermal Engineering (2019).
5. Wei W., Deliang Z., Jizhen L., Yuguang N., Can C. Feasibility analysis of changing turbine load in power plants using continuous condenser pressure adjustment. Energy. 2014. V. 64. P. 533-540.
6. Medica-Viola V., Pavković B., Mrzljak V. (2018). Numerical model for on-condition monitoring of condenser in coal-fired power plants. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. V. 117. P. 912-923.
7. Anozie A.N., Odejobi O.J. The search for optimum condenser cooling water flow rate in a thermal power plant. Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31. P. 4083-4090.
8. Шкловер, Г. Г. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
9. Шемпелев А.Г., Иглин П.В., Суших В.М. Оценка влияния эксплуатационных факторов на содержание кислорода в конденсате на выходе из конденсатора паровой турбины // Проблемы региональной энергетики. 2017. № 2 (34). С. 81-89.
10. Шемпелев А.Г., Иглин П.В. О причинах повышенного содержания кислорода в конденсате при работе конденсатора в близких к номинальным режимах // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017). Киров: Вятский государственный университет, 2017. С. 2385-2391.
11. Бродов Ю.М. Современное состояние и тенденции в проектировании и эксплуатации конденсаторов мощных паровых турбин ТЭС и АЭС. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 100 с.
12. L. de Kerret, et al. A Case Study of the French Nuclear Power Industry Steam Surface Condenser Tubes Forty Years Later // EPRI Condenser Symposium. August 3–4, 2011. Chicago, Illinois. P. 10
13. Бродов Ю.М., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю., и др. Повышение эффективности теплообменных аппаратов паротурбинных установок за счет применения профильных витых трубок // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2016. №7-8.
14. Деаэрирующий конденсатосборник для турбин (ДК ЭКОТЕХ). — Текст : электронный // ЭКОТЕХ :Доступно по: URL: <https://ecology-technology.ru/katalog-oborudovaniya/dk-ecotech-dlja-turbin/>. Ссылка активна на: 21.12.2020.
15. Кирш А. К. Деаэрация конденсата в конденсаторах паровых турбин / М.: Бюро технической информации ОРГРЭС, 1960. 28 с.
16. Виноградов В.Н, Ледуховский Г.В, Барочкин А.Е, и др. Деаэрационные испытания конденсатора турбины при повышенном содержании свободной углекислоты в остром паре // Вестник ИГЭУ. 2009. №2.
17. Водениктов А.Д., Чичирова Н.Д. Влияние температуры охлаждающей воды на деаэрирующую способность конденсатора 200-КЦС-2 // Труды Академэнерго. 2020. №4 (61).

Авторы публикации

Водениктов Артем Дмитриевич – аспирант кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Чичирова Наталья Дмитриевна – д-р хим. наук, профессор, заведующая кафедрой «Тепловые электрические станции» (ТЭС), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Mendelev DI, Mar'in GE, Ahmetshin AR.. Pokazateli rezhimnykh harakteristik parogazovogo energobloka PGU-110 MVt na chastichnykh nagruzkah. *Vestnik KGEU*. 2019;3(43).
2. Aminov RZ, Garievsky MV. The efficiency of combined-cycle chp plant with variable electric loads, taking into account the wear and tear of equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(7-8):10-22. Available at: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-10-22>
3. Alabrudzinski S, Markowski M., Trafczynski M, et al. The Influence of Fouling Build-up in Condenser Tubes on Power Generated by a Condensing Turbine. *Chemical Engineering Transactions*. 2016;52:1225-1230. doi: 10.3303/CET1652205
4. Gap Park Y, Youl Yoon S, Min Seo Y, M. et al. A study on the optimal arrangement of tube bundle for the performance enhancement of a steam turbine surface condenser. *Applied Thermal Engineering* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114681>.
5. Wei W, Deliang Z, Jizhen L, et al. Feasibility analysis of changing turbine load in power plants using continuous condenser pressure adjustment. *Energy*. 2014;64:533-540. doi: 10.1016/j.energy.2013.11.001.
6. Medica-Viola V, Pavković B, Mrzljak V. (2018). Numerical model for on-condition monitoring of condenser in coal-fired power plants. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;117:912-923. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.
7. Anozie A.N., Odejebi O.J. The search for optimum condenser cooling water flow rate in a thermal power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31:4083-4090. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.014.
8. SHklover GG. *Issledovanie i raschet kondensacionnykh ustrojstv parovykh turbin*. M.: Energoatomizdat, 1985. 240 p.
9. Hempelev AG, Igl'in PV, Sushchih VM. Ocenka vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na sodержanie kisloroda v kondensate na vyhode iz kondensatora parovoy turbiny. *Problemy regional'noy energetiki*. 2017;2(34):81-89.
10. Hempelev S.A.G., Igl'in P.V. O prichinakh povyshennogo sodержaniya kisloroda v kondensate pri rabote kondensatora v blizkikh k nominal'nykh rezhimam. *Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2017)*. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet. 2017. p. 2385-2391.
11. Brodov YUM. *Sovremennoe sostoyanie i tendencii v proektirovanii i ekspluatatsii kondensatorov moshchnykh parovykh turbin TES i AES*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2019. 100 p.
12. Kerret Le., et al. A Case Study of the French Nuclear Power Industry Steam Surface Condenser Tubes Forty Years Later. EPRI Condenser Symposium. August 3–4, 2011. Chicago, Illinois. P. 10
13. Brodov YuM, Aronson KE, Ryabchikov AYU, et al. Povyschenie effektivnosti teploobmennyykh apparatov paroturbinnyykh ustanovok za schet primeneniya profil'nykh vitykh trubok *Izvestiya Vuzov. Problemy energetiki*. 2016;7-8.
14. Deaeriruyushchij kondensatosbornik dlya turbin (DK EKOTEKH) URL: <https://ecology-technology.ru/katalog-oborudovaniya/dk-ecotech-dlja-turbin/> Accessed to: 21.12.2020.
15. Kirsh AK. Deaeraciya kondensata v kondensatorah parovykh turbin. M.: Byuro tekhnicheskoy informacii ORGRES, 1960. 28 p.
16. Vinogradov VN, Leduhovskij GV, Barochkin A.E, Prohorova E.A. Deaeracionnye ispytaniya kondensatora turbiny pri povyshennom sodержanii svobodnoj uglekisloty v ostrom pare. *Vestnik IGEU*. 2009;2.
17. Vodenikov AD, Chichirova ND. Influence of the temperature of the cooling water on the deaeration capacity in the KCS-200-2 condenser. *Transactions of Academenergo*. 2020;4 (61).

Authors of the publication

Artem D. Vodenikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nataliya. D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

20 ноября 2020г.

Отредактировано

11 декабря 2020г.

Принято

14 декабря 2020г.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НОРМАТИВА ПО ОКСИДАМ СЕРЫ ДЛЯ КОТЛОВ ТЭС

А.М. Грибков

Казанский государственный энергетический университет,
Г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6805-2451>, GribkovAlMi@mail.ru

Резюме: Тепловые электростанции (ТЭС) сжигают более 30 % добываемого топлива, причем это топливо наименее качественное. Это, как правило, или высокзолый или высоковлажный, зачастую высокосернистый уголь, или отходы от переработки нефти и попутный нефтяной газ. Если на станции основным топливом является природный газ, то для создания запаса топлива все равно сооружаются мазутные хозяйства. Но даже если газомазутная ТЭС использует в своем топливном балансе лишь незначительную долю мазута, допустимое экологическое воздействие рассчитывается на максимальное использование наиболее грязного топлива, т.е. мазута. Таким образом ТЭС являются или действующими или потенциальными источниками выбросов оксидов серы. **ЦЕЛЬ.** Разработка способов уменьшения выбросов серы без установки в тракте уходящих газов специального сероочистного оборудования. В ряде случаев это возможно, если использовать поглощательную способность щелочных компонентов золы твердого топлива или дозирования гашеной извести в мазут при контроле допустимого выброса твердых частиц при отсутствии золоуловителей на газомазутных котлах. Разработанная **МЕТОДИКА** позволят проследить всю цепочку необходимых действий исходя из состава топлива до выбора основных параметров предлагаемых методов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложены формулы для расчета необходимой степени очистки продуктов сгорания. Предложены методы уменьшения выбросов оксидов серы при использовании отечественного оборудования для пылеугольных котлов. Предложено решение для уменьшения выбросов оксидов для котлов, сжигающих мазут, и не имеющих золоуловителей.

Ключевые слова: оксиды серы, котлы, зольность топлива, мазут, щелочные добавки, топка, выбросы твердых частиц, дымовая труба.

Для цитирования: Грибков А.М. Обеспечение технологического норматива по оксидам серы для котлов ТЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 164-175. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-164-175.

PROVIDING OF TECHNOLOGICAL NORM ON OXIDES OF SULPHUR FOR STEAM BOILERS AT THERMAL POWER STATIONS

AM. Gribkov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6805-2451>, GribkovAlMi@mail.ru

Abstract: Thermal power plants (TPPs) burn more than 30% of the produced fuel. Also this fuel is worst in quality. This is usually either high-ash or high-moisture, often high-sulfur coal, or waste from oil refining and associated petroleum gas. If the main fuel at the plant is natural gas, then fuel oil farms are still being built to create a fuel reserve. But even if a gas-oil plant uses only a small part of fuel oil in its fuel balance, the permissible environmental impact is calculated on the maximum use of the dirtiest fuel, i.e. fuel oil. Thus, thermal power plants are either active or potential sources of nitrogen oxide emissions. **PURPOSE.** Development of methods for decreasing sulfur emissions without installing special desulfurization equipment in the exhaust gas path. In

some cases, this is possible if the absorption capacity of the alkaline components of solid fuel ash or the dosing of slaked lime into fuel oil is used to control the permissible emission of solid particles in the absence of ash collectors on gas-and-oil boilers. The developed METHODOLOGY will allow us to trace the entire chain of necessary actions based on the fuel composition before selecting the main parameters of the proposed methods. RESULTS. The formulas for calculating the required degree of purification of combustion products are proposed. Methods decrease sulfur oxides emissions in domestic equipment using for pulverized coal boilers. Solution allows to decrease oxide emissions for boilers that burn fuel oil and do not have ash traps.

Keywords: sulfur oxides, boilers, fuel ash content, fuel oil, alkaline additives, fire-chamber, solid particle emissions, smoke stack.

For citation: Gribkov AM. Providing of technological norm on oxides of sulphur for steam boilers at thermal power stations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):164-175. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-164-175.

Введение

Диоксид серы образуется в топках котлов при сгорании серосодержащего топлива. Сера, входящая в состав топлива, достаточно хорошо горит с выделением тепла, и в топке вся сгорает. Количество образовавшихся оксидов серы легко определяется по реакции горения серы и практически не зависит от режима работы котла. Применяемые на ТЭС методы позволяют обеспечить надежный приборный контроль текущего содержания серы в топливе, что позволяет контролировать выброс оксидов серы.

Диоксид серы, это ядовитый газ, при вдыхании которого в концентрации в воздухе более $0,5 \text{ мг/м}^3$ в течение более 20 минут, с применением специальных методов исследований, в организме человека могут быть найдены экспериментально подтверждаемые изменения. Такая концентрация установлена в Российской Федерации (РФ) как предельно допустимая (ПДК) для зоны проживания людей. Диоксид серы приводит также к разрушению в организме витаминов В1 и В12. Но наиболее чувствительными к присутствию оксидов серы в воздухе являются растения. Для хвойных пород ПДК установлена на уровне $0,35 \text{ мг/м}^3$. Большинство людей субъективно такую концентрацию не ощущает. Для рабочей зоны ПДК в РФ составляет 10 мг/м^3 , т.е. в 20 раз выше.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) концентрация $0,5 \text{ мг/м}^3$ допустима не более 10 минут. В противном случае у людей, страдающих астматическими заболеваниями при выполнении физических нагрузок, наблюдаются проблемы с дыханием и респираторные симптомы. Это не относится к рабочей зоне, т.к. предполагается, что люди, с такими заболеваниями на производстве не работают.

Более сложным является определение ПДК за более длительный промежуток времени, за который приняты сутки. По мере накопления статистического материала, его обработки и анализа, менялись и рекомендации ВОЗ. В 1987 г за среднесуточное ПДК было принято значение $0,125 \text{ мг/м}^3$, в 2000 г. – $0,05 \text{ мг/м}^3$, а в 2005 г. – $0,02 \text{ мг/м}^3$. При длительном нахождении в зоне высоких концентраций могут развиваться хронические болезни, связанные с органами дыхания, что подтверждается статистическими показателями смертности. В РФ среднесуточная ПДК = $0,05 \text{ мг/м}^3$.

В рекомендациях ВОЗ учитывается также то, что уровень ПДК зависит от социально-экономических условий. Поэтому он принимается для каждой страны отдельно. Целью ПДК является продление жизни людей. Поэтому в каждой стране принимается решение куда вкладывать средства в первую очередь. Зачастую, особенно для развивающихся стран, оказывается, что вложение средств в медицину дает больший прирост срока жизни, чем более глубокая очистка выбросов. Не могут долго жить даже в чистом воздухе бедные и больные люди. Поэтому уровни ПДК в $0,125$ и $0,05 \text{ мг/м}^3$ устанавливаются ВОЗ как промежуточные показатели ПП1 и ПП2 [1].

В большинстве стран мира проводятся работы по уменьшению выбросов оксидов серы в атмосферу, так как они влияют на все компоненты природной среды и наносят значительный ущерб народному хозяйству [2]. Так, например, в США выброс диоксидов серы с 16,35 млн. т. в 2000 г. снизился до 2,2 млн. т. в 2019 г. В России, где промышленная производство намного меньше американского, в 2018 г. было выброшено 3,7 млн. т. [3]. Причина этого в отсутствии очистки продуктов сгорания от диоксида серы на большинстве топливосжигающих установок.

Оксиды серы (в котлах при высоких температурах в небольших количествах образуется и триоксид серы) это не только загрязнитель воздуха, но и примесь, приводящее к ускорению низкотемпературной сернокислотной коррозии котлов. Причем корродировать могут не только конвективные поверхности теплообмена, но и трубы подового экрана во время стоянки котла [4].

В настоящее время в РФ приняты такие нормативы по концентрациям оксидов серы в продуктах сгорания котлов, обеспечение которых для преобладающего количества видов топлива без специальных мероприятий выполнить невозможно.

Законом N219-ФЗ от 2014 г. установлено, что кроме обеспечения норматива качества окружающей среды, а именно ПДК на уровне дыхания, предприятия должны будут выполнять и технологические нормативы выбросов. Технологический норматив – это норматив допустимых выбросов в расчете на единицу выпускаемой продукции. Технологические нормативы устанавливаются с применением технологических показателей. Одним из технологических показателей на ТЭС являются концентрации вредных веществ в продуктах сгорания котлов. Технологические нормативы устанавливаются комплексным экологическим разрешением на основании справочников по наилучшим доступным технологиям. В России такой справочник вышел в свет в 2017 г.*¹.

При этом технологические нормативы не обязаны обеспечивать нормативы допустимого воздействия на окружающую среду. (ст. 21, п. 2). «Соблюдение нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, за исключением технологических нормативов и технических нормативов, должно обеспечивать соблюдение нормативов качества окружающей среды». Т.е. теперь, даже если норматив качества окружающей среды выполняется, технологический норматив должен выполняться независимо от него. Если раньше проблема соблюдения нормативов качества окружающей среды решалась наиболее дешевым способом – установкой высоких дымовых труб, то теперь потребуются значительно большие затраты для очистки дымовых газов. Это требование остается в силе и в том случае, если приземные концентрации от выбросов ТЭС ниже ПДК.

В то же время системы очистки уходящих газов от оксидов серы в настоящее время в РФ не выпускаются. Однако за счет предлагаемых в статье методов проблему можно несколько смягчить.

Определение необходимой степени поглощения SO₂

Наибольшие допустимые значения концентраций оксидов серы в уходящих газах котлов в пересчете на сухой газ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,40$, температуре $t = 0^\circ\text{C}$ и давлении $p = 760$ мм рт. ст. для котельных установок, введенных на Российских ТЭС до 31 декабря 2000 г., для твердых и жидких видов топлива приведены в табл. 1, [5].

Таблица 1

Допустимые значения концентраций оксидов серы для котельных установок, введенных до 31 декабря 2000 г

Паропроизводительность котла, т/ч	Приведенное содержание серы $S_{пр}$, %·кг/МДж	Массовая концентрация SO _x в дымовых газах при $\alpha = 1,4$, мг/м ³
До 420	0,045 и менее более 0,045	2000 3400
400 и более	0,045 и менее более 0,045	2000 3000

Для котельных установок для твердых и жидких видов топлива, вводимых на российских ТЭС с 1 января 2001 г., допустимые значения концентраций оксидов серы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Допустимые значения концентраций оксидов серы для котельных установок, введенных с 1 января 2001 г

Паропроизводительность котла, т/ч	Приведенное содержание серы $S_{пр}$, %·кг/МДж	Массовая концентрация SO _x в дымовых газах при $\alpha = 1,4$, мг/м ³

*¹ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям, М. – Бюро НДТ, 2017, 271 с.

до 320	0,045 и менее более 0,045	1200 1400
320-400	0,045 и менее более 0,045	950 1050
400 и более	-	700

Как видно из таблиц, допустимая концентрация оксидов серы для котлов производительностью 400 т/ч и более уменьшена с 3000 до 700 мг/м³. Однако на этих котлах, введенных с 1 января 2001 г., никаких дополнительных устройств по снижению этих концентраций, реализовано не было, в результате энергетика к этому оказалась недостаточно подготовлена.

Россия ставит перед собой задачу гармонизации экологических стандартов со стандартами стран ЕС. Поэтому приведем значения концентраций SO₂ в этих странах [6]. Предельные концентрации сернистого ангидрида для установок, пущенных в эксплуатацию до 7 января 2014 г. составляют: для твердого топлива при тепловой мощности котла Q_T = 50–100 МВт SO_x = 400 мг/м³, для Q_T = 100–300 МВт SO_x = 250 мг/м³, для Q_T = >300 МВт SO_x = 200 мг/м³. Для жидкого топлива при Q_T = 50–100 МВт SO_x = 350 мг/м³, при Q_T = >100 МВт SO_x принимается такой же, как для твердого топлива.

Начиная с 2016 г. эти нормы составляют: для твердого топлива при тепловой мощности котла Q_T = 50–100 МВт SO_x = 400 мг/м³, для Q_T = 100–300 МВт SO_x = 200 мг/м³, для Q_T = >300 МВт SO_x = 150 мг/м³ (для котлов с циркулирующим кипящим слоем 200 мг/м³). Для жидкого топлива при Q_T = 50–100 МВт SO_x = 350 мг/м³, при Q_T = >100 МВт SO_x принимается такой же, как для твердого топлива.

В странах ЕС нормативным для твердого топлива считается содержание кислорода в продуктах сгорания O₂ = 6 %, (так же, как и в РФ), но для мазута нормативным является избыток воздуха O₂ = 3 %. Для сравнения с нормативами российских ТЭС при сжигании мазута после пересчета на O₂ = 6 % вместо 400 будет 333 мг/м³, а вместо 200 – 167 мг/м³. Тепловые 50 МВт примерно соответствуют производительности котла 70 т/ч, 300 МВт – 420 т/ч, 500 МВт – 700 т/ч.

Массовая концентрация при нормальных условиях, которая будет создаваться в продуктах сгорания, зависит только от сернистости топлива, объема продуктов сгорания одного килограмма топлива и избытка воздуха в продуктах сгорания. Так, например, из [7] имеем табл. 3.

Таблица 3

Необходимая степень очистки газов от оксидов серы

№ п/п	Бассейн, месторождение	Марка, класс	S ^p , %	V _Г ⁰ , м ³ /кг	C _{SO₂} ^{α=1,4} , мг/м ³	η _{SO₂} [']	η _{SO₂} %
1	2	3	4	5	6	7	8
1 (2)	Донецкий	Д, отсев	3,4	4,98	9754	0,1	92,0
2 (30)	Кузнецкий	Г, промпродукт	0,6	5,35	1602	0,1	51,4
3 (48)	Карагандинский	Р, отсев	0,7	4,78	2092	0,1	62,8
4 (54)	Экибастузский	СС, Р	0,7	4,56	2193	0,02	67,4
5 (61)	Подмосковный	2Б, Р	2,5	2,47	14459	0,1	94,6
6 (63)	Печерский	Д, отсев	2,5	4,50	7936	0,1	90,2
7 (68)	Кизеловский	Г, промпродукт	7,2	5,29	19443	0,1	96,0
8 (88)	Назаровское*	2Б, Р	0,4	4,34	1317	0,2	33,6
9 (89)	Березовское*	2Б, Р	0,2	5,03	821	0,5	-
10 (138)	Южно-Сахалинский	3Б, Р	0,5	3,97	1799	0,1	56,8
11 (143)	Ленинград-сланец	Сланец	1,3	2,39	7770	0,8	55,0
12 (1)	Мазут-100	Низкосернистый	0,39	11,76	474	0,02	-
13 (4)	Мазут-100	Высоко-сернистый	2,55	11,22	3247	0,02	78,0
14 (13)	Попутный газ	Ярино-Пермь	1,1**	13,90***	1634	0	57,2

* - Канско-Ачинский бассейн

** - объемная доля сероводорода (H₂S)

*** - размерность м³/м³.

В столбце 1 кроме номера текущей позиции указан еще номер топлива из [7]: по табл. 1 для твердых топлив, по табл. III, для мазута и по табл. IV для газа. Столбцы 2, 3, 4 заполнены также по данным этих таблиц. Столбец 5 (теоретический объем сухих продуктов сгорания при нормальных условиях) заполнен по данным табл. XII из [7].

В столбце 6 рассчитываем концентрацию оксидов серы в продуктах сгорания этого топлива при стандартном избытке воздуха. Все вычисления делаем на один кг топлива. Зная сернистость топлива (столбец 4), находим массовое содержание серы в нем. $M_S = 10 \cdot S^P$ г/м³. Учитывая, что реакция горения серы $S + O_2 = SO_2$ (образованием серного ангидрида пренебрегаем ввиду его малых количеств) видим, что SO_2 получается в два раза больше, чем серы, т.е. при сгорании одного кг S образуется два кг SO_2 , т.е. $M_{SO_2} = 20 \cdot S^P$ г/м³. Далее несложно получить, что концентрация оксидов серы в продуктах сгорания $C_{SO_2}^{\alpha=1,4}$, мг/м³, равна

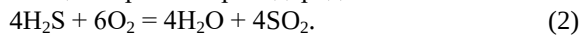
$$C_{SO_2}^{\alpha=1,4} = 14285 \cdot \left(\frac{S^P}{V_r^0} \right). \quad (1)$$

В формуле (1) S^P – сернистость топлива на рабочую массу подставляется в %, V_r^0 – теоретический объем продуктов сгорания, в м³/кг.

Более 20 % генерирующих мощностей тепловых электростанций в Европейской части России и более 80 % генерирующих мощностей в Восточной части России используют уголь. Всего на угле работают более 70 тепловых электростанций (интернет-ресурс <https://ru.wikipedia.org/wiki/>).

Немного по-другому рассчитывается эта величина для попутного газа. Здесь присутствие серы отмечается в виде сероводорода H_2S в процентах по объему. Объемная доля H_2S в строке 14 табл. 3 составляет 1,1 % или 0,011 м³/м³. Плотность сероводорода составляет $\rho_{H_2S} = 1,539$ кг/м³.

Реакция горения сероводорода:



Из реакции видно, что при сгорании 1 кг H_2S образуется 1,882 кг SO_2 . При сгорании одного м³ газообразного топлива образуется 13,9 м³ продуктов сгорания при $\alpha = 1$ и при нормальных условиях. В результате получаем формулу для расчета $C_{SO_2}^{\alpha=1,4}$, мг/м³.

$$C_{SO_2}^{\alpha=1,4} = 20653 \cdot \left(\frac{H_2S}{V_r^0} \right), \quad (3)$$

где H_2S подставляется в %, V_r^0 в м³/м³.

Часть оксидов серы может поглощаться золой топлива [8]. Эта величина учтена в столбце 7, η'_{SO_2} . Здесь приведены данные для котлов с сухим шлакоудалением. При жидком шлакоудалении эти значения в 3-4 раза меньше.

Учитывая, что часть диоксида серы поглощается собственной золой топлива, получаем формулу для определения степени очистки дымовых газов от оксидов серы, η_{SO_2}

, %, когда будет обеспечиваться заданный норматив $C_{SO_2}^H$, мг/м³,

$$\eta_{SO_2} = 100 \cdot \left(1 - \frac{C_{SO_2}^H}{C_{SO_2}^{\alpha=1,4} \cdot (1 - \eta'_{SO_2})} \right). \quad (4)$$

Подставляя в качестве нормативного значения SO_x , мг/м³ из табл. 2, а для котлов производительностью 400 т/ч и более это $C_{SO_2}^H = SO_x = 700$ мг/м³, и рассчитывая по формуле (4), заполняем столбец 8. Как видно из табл. 3, без очистки от оксидов серы могут быть обеспечены требуемые концентрации только при сжигании низкосернистого мазута и Березовского угля Канско-Ачинского бассейна. При этом максимально допустимой сернистостью мазута является 0,57 %. Если сжигается мазут с сернистостью 2,55 %, то, для обеспечения непревышения допустимой концентрации оксидов серы в продуктах сгорания он должен сжигаться одновременно с природным газом в соотношении не более 22 % по тепловыделению.

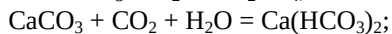
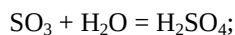
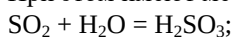
Это же условие будет выполняться, если сжигать смесь Березовского и Назаровского углей в соотношении 24 к 76 % соответственно.

Сероочистка уходящих газов в мировой практике

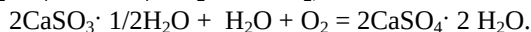
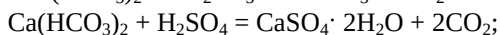
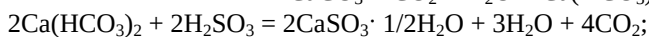
Сероочистка дымовых газов в зарубежных технически развитых странах мира, в отличие от России, развита широко. Подавляющее большинство котлов, сжигающих мазут или твердое топливо оборудованы системами сероочистки. В большинстве случаев (примерно 80 %) применяются мокрые скрубберы, с использованием известняка. Это обусловлено их высокой эффективностью по удалению SO_2 и высокой надежностью. Немалую роль играет и то, что известняк доступен в больших количествах и он дешевле, чем прочие сорбенты. Побочными продуктами являются либо гипс, либо сульфит/сульфат кальция, в зависимости от режима окисления. Если гипс продается, то эксплуатационные расходы снижаются. Все новые котлы, топливо которых содержит серу, оборудуются устройствам сероочистки уходящих дымовых газов.

Суть такого процесса заключается в организации прохождения дымовых газов через объем, густо заполненный как можно более мелкими каплями водо–известняковой суспензии. Эта технология основана на связывании диоксида и триоксида серы с образованием сульфита кальция, который доокисляется до двухводного сульфата (гипса).

При этом имеют место следующие реакции:



(5)



Принципиальная схема мокрой известняковой очистки показана на рис. 1, [9].

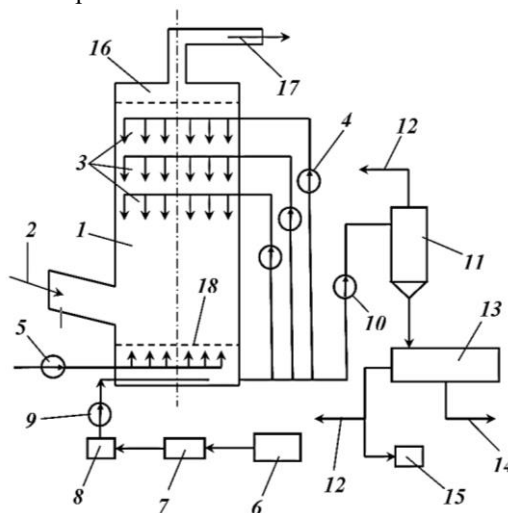


Рис. 1. Принципиальная схема мокрой известняковой очистки:

1 – абсорбер; 2 – вход дымовых газов; 3 – оросительное устройство; 4 – насосы циркуляции известняковой суспензии; 5 – вентилятор подачи воздуха; 6 – склад известняка; 7 – дробилки мельницы для известняка; 8 – узел приготовления суспензии; 9 – насос подачи суспензии; 10 – насос отвода части суспензии из цикла; 11 – разделитель твердой и жидкой фаз; 12 – возврат жидкой фазы в абсорбер; 13 – узел обезвоживания гипса; 14 – выход готового гипса; 15 – очистка сточной воды; 16 – сепарационное устройство; 17 – выход очищенных газов; 18 – верхний уровень известняковой суспензии

Основная часть оксидов серы при сгорании топлива получается в виде сернистого ангидрида SO_2 (95-96%), остальная часть в виде серного ангидрида SO_3 . Серный ангидрид хорошо растворим в воде (жадно поглощается), с образованием серной кислоты H_2SO_4 , а сернистый растворяется значительно хуже с образованием неустойчивой сернистой кислоты H_2SO_3 . Образующийся гидрокарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ реагирует с сернистой и серной кислотой с образованием двухводного $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или полуводного $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ гипса. Полуводный гипс с помощью продувки воздухом доокисляется до двухводного гипса.

Установка работает следующим образом: дымовые газы после золоуловителя попадают в абсорбер. Сюда же насосом 9 подается известняковая суспензия – смесь известняковой пыли тониной помола известняка 75–150 мкм с водой при концентрации не

более 15 % во избежание засорения абсорберов. Известняк также частично растворяется в воде. Нижняя часть абсорбера заполнена известняковой суспензией. В верхней части абсорбера находится состоящее из нескольких ярусов оросительное устройство, основными элементами которого являются разбрызгивающие форсунки и подающие к ним суспензию трубопроводы.

В связи с малой растворимостью известняка в воде, применяется высокая интенсивность орошения, достигающая до 22 л/м³, а суспензия с помощью насосов 4 циркулирует в абсорбере многократно. Для доокисления сульфита кальция в двухводный гипс вентилятором 5 подается воздух. В верхней части абсорбера находится сепарационное устройство, предотвращающее унос крупных капель с дымовыми газами.

Насосом 10 обеспечивается непрерывная продувка абсорбера, позволяющая обеспечить допустимое содержание карбоната кальция в воде и уменьшение скорости образования отложений в корпусе абсорбера. Продувочная суспензия поступает в разделитель твердой и жидкой фаз 11, например в гидроциклоны. Жидкая фаза возвращается в абсорбер, а твердая подается в узел обезвоживания гипса 13. Обезвоживание гипса происходит в вакуумных фильтрах. В зависимости от режима работы установки фильтрат также может возвращаться в абсорбер, линия 12, или через очистное устройство 15 сбрасываться в окружающую среду. Обезвоженный гипс подается на склад готовой продукции, 14.

Данный способ может обеспечить очистку дымовых газов от оксидов серы с эффективностью до 95 %. Преимуществом данного способа перед большинством других является его экологическая безопасность, т.к. и реагент, и отходы нейтральны и плохо растворимы в воде.

Одним из положительных факторов данного способа является практически полное удаление SO₃, что снижает вероятность низкотемпературной коррозии следующих по ходу элементов газовоздушного тракта и допускает некоторое снижение температуры уходящих дымовых газов, что повышает КПД котла.

Наибольшие трудности возникают из-за необходимости периодической остановки сероулавливающей установки для очистки аппаратуры от кристаллических отложений CaSO₃ и брызгоуловителей от отложений, содержащихся в каплях взвешенных веществ.

Основываясь на опыте США, необходимыми условиями этого способа является практически удвоение площади, занимаемой энергоблоком, увеличение его стоимости на 20–25 % и удорожание производства электроэнергии примерно на 10–15 %. И это при налаженном и отработанном производстве систем сероочисток в своей стране. Применительно к России все выглядит более сложным: необходимы или дополнительные расходы на разработку, освоение и собственное производство данного вида оборудования, или коммерческие наценки на его закупку за рубежом, в том числе с возможностью неожиданного применения санкций и прекращения поставок запасных частей.

Возможности по уменьшению выбросов оксидов серы в России

Без специальных мероприятий по уменьшению выбросов оксидов серы нормы, приведенные в табл. 2 обеспечить невозможно. Сложилась ситуация, когда нормы приняты, а для их выполнения своего специального газоочистного оборудования нет, поэтому приходится платить за импорт. Находящиеся в периоде освоения сероочистки на Троицкой и на Черепетской ГРЭС этоодна производства КНР, другая - NiD-технология фирмы «Альстом».

Однако в ряде случаев могут быть применены более дешевые технологии с использованием возможностей отечественного оборудования. Так, например, разработана сухая известняковая технология, основана на подаче в верхнюю часть топки размолотого известняка [9].

Подача сорбента в топку рассматривается как один из способов наилучшей доступной технологии сжигания топлива с малыми вредными выбросам [10].

Реакции удаления SO₂ при подаче размолотого известняка топку следующие:



Реакции идут при температурах газов в интервале 980–1230°C и около 540°C. В результате реакции образуется безводный гипс. Его температура плавления 1450°C, поэтому он практически не участвует в шлаковании ширм, но увеличивает занос конвективных поверхностей нагрева. Как и во всех сухих технологиях, указанная реакция

проходит только на поверхности твердого вещества, поэтому здесь важна тонина помола реагента.

Свободная окись кальция реагирует в первую очередь с триоксидом серы SO_3 , который в небольших количествах также образуется в топке и является причиной повышенной сернокислотной коррозии. Это уменьшает концентрацию SO_3 , что приводит к снижению температуры точки росы и позволяет уменьшить температуру уходящих газов с повышением КПД котла.

Недостатком этого варианта является то, что в топке нужно соорудить систему для равномерного распределения известняковой пыли по сечению топки, что является сложной задачей. Эти устройства должны будут находиться в зоне высоких температур и потребуются специальные меры по их охлаждению.

Разработан также способ ввода щелочных сорбентов в газоходы. Он практически не требует дополнительного оборудования и затраты в этом случае меньше, чем при скрубберной сероочистке, но и эффективность его меньше [11]. Эти способы имеют эффективность улавливания SO_2 от 40 до 60 % [12].

В котельных установках сжигания топлива в кипящем слое известь или известняк добавляют непосредственно в топливо и вводят в псевдоожиженный слой. Эти добавки поддерживают естественную способность щелочной золы связывать SO_2 . В этом случае степень улавливания SO_2 составляет более 90 %^{*2}.

Мы предлагаем вводить известняк вместе с топливом также и для котлов с факельным сжиганием топлива. Известняк нужно подавать в уголь перед дробилками. Затем дробленка поступает в мельницы, где известняк размалывается в пыль вместе с углем. При таком способе ввода для протекания химических реакций используется весь объем топки. И если известняковый компонент обеспечить такой же, как для Березовского угля (строка 9 табл. 3), то можно будет также получить 50 % поглощения оксидов серы зольным содержанием топлива.

Добавка известняка в уголь позволяет увеличить щелочность золы и тем самым повысить поглощение золой оксидов серы. Если взять за образец Березовский уголь, зола которого обеспечивает 50%-ное поглощение сернистого ангидрида, то у него зольность $A^P = 4,7\%$, сернистость $S^P = 0,2\%$, содержание в золе свободной окиси кальция $\text{CaO} = 42\%$.

Такое высокое содержание оксида кальция свидетельствует о том, что зола для этого топлива это на 75% состоит из известняка CaCO_3 , у которого при термическом разложении в CaO переходит 56% массы.

В реакциях связывания оксидов серы участвует CaO . Весь кальций, который находится в топливе, составляет часть зольности этого топлива. Учитываем также то, что количество щелочных компонент для эффективного обессеривания дымовых газов должно быть пропорционально сернистости топлива. Тогда можно в первом приближении принять, что для обеспечения 50% связывания оксидов серы при сжигании угля нужно обеспечить щелочной комплекс $A^P \cdot \text{CaO}/S^P = 0,047 \cdot 0,42/0,002 = 9,87$, подсчитанный по характеристикам Березовского угля. Для других топлив этот комплекс подсчитан в столбце 6 табл. 4.

Так, например, если сжигается кузнецкий уголь, у которого $A^P = 28,7\%$, сернистость $S^P = 0,6\%$, содержание в золе свободной окиси кальция $\text{CaO} = 5,8\%$ комплекс $A^P \cdot \text{CaO}/S^P = 2,774$. Повысить щелочной комплекс можно путем добавки в топливо известняка CaCO_3 . Реакция диссоциации известняка в топке $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ показывает, что для получения 1 кг CaO необходимо 1,786 кг CaCO_3 .

Обозначим отношение молекулярных масс $K_M = \text{CaO}/\text{CaCO}_3 = 0,56$, а комплекс $A^P \cdot \text{CaO}/S^P = K$ (столбец 6 табл. 4) получим уравнение для определения необходимой доли известняка для получения степени улавливания 50 %.

$$x = \frac{A^P S^P}{K_M} \left(\frac{9,87}{K} - 1 \right) \quad (7)$$

где A^P , S^P , и x - в долях от единицы.

Для кузнецкого угля получаем $x = 0,0763$. Таким образом для создания условий связывания оксидов серы золой, близких к условиям Березовского угля, нужно в кузнецкий уголь добавлять еще известняк в количестве 7,63 % от расхода топлива. В результате

^{*2}Справочник по наилучшим доступным технологиям для крупных топливосжигающих установок (пер. с англ.). М.: ОАО ЭНИН, 2009, 649 с.

зольность топлива увеличивается до 36,3 %, т.е. на 26 %. Примерно на 7 % снизится теплотворная способность топлива.

Для некоторых углей это также может сказаться на шлаковании топки. Увеличивается нагрузка на золоуловители и на систему золоудаления. За счет повышения сопротивления газового тракта увеличится и расход электроэнергии на дымососы.

Таблица 4

Щелочной комплекс топлив

№ п/п	Бассейн, месторождение	Марка, класс	A ^p , %	CaO %	$\frac{A^p \cdot CaO}{S^p}$
1	2	3	4	5	6
1 (2)	Донецкий	Д, отсев	27,8	2,0	0,164
2 (30)	Кузнецкий	Г, промпродукт	28,7	5,8	2,774
3 (48)	Карагандинский	Р, отсев	34,6	3,1	1,532
4 (54)	Экибастузский	СС, Р	36,9	1,1	0,580
5 (61)	Подмосковный	2Б, Р	30,6	4,1	0,502
6 (63)	Печерский	Д, отсев	28,8	6,9	0,795
7 (68)	Кизеловский	Г, промпродукт	32,0	3,7	0,164
8 (88)	*Назаровское	2Б, Р	7,9	35,0	6,912
9 (89)	*Березовское	2Б, Р	4,7	42,0	9,870
9 (138)	Южно-Сахалинский	3Б, Р	25,6	5,0	2,560
10 (143)	Ленинград-сланец	Сланец	48,2	50,4	18,69

Это дополнительная нагрузка на станцию. Существенно увеличивается расход электроэнергии на подготовку топлива. Может потребоваться установка более мощных двигателей для привода дробилок и мельниц или снижение номинальной нагрузки котла на 7 %. Если необходимо поглощать более 50%SO₂, то нужно будет еще увеличить количество добавляемого известняка.

В качестве некоторой компенсации можно ожидать увеличения излучательной способности газов в топке за счет увеличения доли трехатомных газов, что приведет к некоторому уменьшению температуры газов на выходе из топки. Также снижается вероятность низкотемпературной коррозии в элементах котла, что позволяет уменьшить температуру уходящих газов и повысить КПД котла.

Эффективность использования известняка при этом не так высока. Его придется подавать в 5,64 раза больше теоретически необходимого, чтобы получить 50 %-ное поглощение SO₂, но и стоимость его достаточно низкая. К тому же техническая реализация такого способа не должна вызывать серьезных затруднений.

Уменьшение выбросов оксидов серы при сжигании мазута

В настоящее время мазут в РФ сжигается в небольших количествах. Всего на трех станциях мазут является основным видом топлива, это Мурманская ТЭЦ, Светловская ГРЭС-2 и Ярославская ТЭЦ-3. Но на многих станциях мазут является резервным топливом.

Отсутствие золоуловителей на котлах, сжигающих мазут и не имеющих золоуловителей, до настоящего времени рассматривалось как непреодолимое препятствие для ввода твердых щелочных компонентов в топку котла. Однако, учитывая тот факт, что оксиды серы и твердые частицы не обладают свойством суммации вредного воздействия, можно рассчитать допустимый выброс твердых частиц при отсутствии золоуловителя.

Рассмотрим это предложение на примере. Пусть на дымовую трубу высотой 250 м с диаметром устья 6 м подключены 4 котла ТГМ-84Б, паропроизводительностью $D_0 = 420$ т/ч и сжигающих каждый по $B = 33$ т/ч мазута сернистостью $S^p = 2,55\%$. Такой мазут относится к высокосернистым, табл. 4. Принимая температуру уходящих газов $t_{yx} = 130$ °С и коэффициент избытка воздуха в дымовой трубе $\alpha = 1,1$, и учитывая, что $V_{\Gamma}^0 = 11,22$ м³/кг, а теоретически необходимый объем воздуха для сгорания одного килограмма мазута $V_B^0 = 10,44$ м³/кг, найдем расход дымовых газов от одного котла в устье дымовой трубы $V_1 = 166$ м³/с и для трубы $V = 664$ м³/с. При такой сернистости мазута каждый котел выбрасывает $MSO_2 = 468$ г/с сернистого ангидрида.

Найдем возможный выброс твердых веществ M , г/с, для допускаемой приземной концентрации $C_{доп} = 0,5$ мг/м³ при температуре наружного воздуха $t_b = 20$ °С [13]

$$M = \frac{c_{\text{доп}} H^2 \sqrt[3]{V \Delta t}}{A F m n}, \quad (8)$$

где H – высота дымовой трубы, м; $\Delta t = t_{yx} - t_b = 130 - 20 = 110$ °С; коэффициент температурной стратификации $A = 160$; при отсутствии очистки выбросов коэффициент осаждения примеси $F = 3$.

Коэффициент m найдем по формуле

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}}. \quad (9)$$

Коэффициент f в (9) найдем по формуле

$$f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta t}, \quad (10)$$

где w – скорость выхода газов из устья дымовой трубы, м/с; D – диаметр устья дымовой трубы. Принимая $D = 6$ м, найдем $w_0 = 23,48$ м/с.

Подставив принятые численные значения, получаем $f = 0,993$. Далее находим комплекс v_M

$$v_M = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V \Delta t}{H}}. \quad (11)$$

Подставив принятые численные значения, получаем $v_M = 4,31$. При $v_M > 2$ $n = 1$.

Подставив принятые численные значения, получаем $M = 2705$ г/с или для одного котла $M_1 = 676$ г/с. При зольности мазута 0,1% выброс мазутной золы составит 10 г/с. Тогда допустимый выброс твердых веществ за счет присадки извести составит $M_{\text{из}} = 666$ г/с.

Эффективным способом ввода щелочной присадки в топку, по-видимому, является, ввод гашеной извести в виде третьего компонента в составе водомазутной эмульсии. Учитывая малые размеры и массу частиц гашеной извести после кавитатора, можно ожидать, что и частицы безводного гипса будут иметь примерно такие же размеры, как и частицы мазутной золы, что обеспечит отсутствие их заметной сепарации в топке и газоходах. Ввод гашеной извести может осуществляться и по другим схемам дозирования присадок в мазут [14].

Реакция извести с оксидами серы может быть записана в виде



Полуводный гипс в топке переходит в безводный гипс CaSO_4 . На основании этой реакции видим, что при расходе $\text{CaSO}_4 = 676$ г/с может быть поглощаться 323 г/с SO_2 , что составляет $323/468 = 0,69$ или 69% от всех образовавшихся оксидов серы.

Потребный расход извести составит 1365 кг/ч, что составляет 4,1 % от расхода топлива. Это еще не полное решение для выполнения норматива по выбросу оксидов серы (для рассмотренного примера нужен кпд = 78%), но уже значительное приближение к нему.

Данный пример приведен для теоретических соотношений масс при реакциях взаимодействия. Реальную величину можно определить только при промышленных испытаниях. В [15] приведены данные промышленных испытаний по вводу в топку вместе с воздухом обезвоженного карбонатного шлама водоподготовки. Суммарная доля кальция и магния в этом шламе составляла 51,25 %. При вводе шлама в количестве 3 % от расхода топлива было получено уменьшение концентрации диоксидов серы в дымовых газах на 36 %. В нашем случае доля кальция в сорбенте составляет 54 %, а максимальное количество сорбента – 4,1 %. Если принять, что степень использования щелочных элементов окажется такой же, то в нашем случае можно ожидать реальной степени очистки 51,8 %.

Такой способ снижения выбросов оксидов серы может быть востребован при краткосрочных режимах сжигания мазута, когда нет необходимости сооружать дорогостоящую полномасштабную импортную сероочистку, рассчитанную на постоянное использование при максимальной нагрузке, и которая более 90 % времени будет бездействовать.

В том случае, если потребуются достижение необходимого кпд по улавливанию серы, перед дымососом можно установить, например, относительно недорогой прямоугольный сепаратор, разработанный для улавливания твердых частиц размером менее 10 мкм. При увеличении площади поперечного сечения газохода вдвое он сможет улавливать до 60% мелкой пыли [16]. В том случае, если, по каким-либо причинам, ввод извести не проводится, этот сепаратор может быть использован для улавливания мазутной золы с целью извлечения из нее пентоксида ванадия.

Заключение

Предложения, изложенные в настоящей работе, позволяют в некоторой степени снизить, а иногда и снять остроту создавшейся проблемы обеспечения допустимых концентраций оксидов серы в уходящих газах котлов и уменьшить зависимость от импортного оборудования. Однако для полного решения нужно организовать выпуск собственного газоочистного оборудования.

Литература

1. Air Quality guidelines for particulate matter, Ozone, Nitrogen, Dioxide, Sulfur Dioxide. / Bulletin of the World Health Organization/1211 Geneva 27 Switzerland, 2005. 31 p.
2. Vallero D. Fundamentals of Air Pollution. 4th edition. Elsevier, 2014. 986 p.
3. Sulfur dioxide emissions United States 2019 | Statista / 2021, 5 с [Электронный ресурс]: www.statista.com/statistics/501303/volume-of-sulfur-dioxide-emissions-us/.
4. Зройчиков Н.А., Грибков А.М., Перфильев А.О. и др. / Исследование влияния содержания серы в топливе на эффективность и экологическую безопасность работы котлов при сжигании непроектных видов топлива // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE) № 01-03. 2018. С. 103-117.
5. ГОСТ Р 55173-2012. Установки котельные. Общие технические требования. М.: ФГУП Стандартиформ, 2014, 20 с.
6. Directive 2010/75/EU of the European parliament and the council / Official Journal of the European Union, L 334/17, 2010, 103 p.
7. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Под редакцией С.И. Мочана и др., С-Петербург, из-во РАО «ЕЭС России». 1998. 259 с.
8. РД 34.02.305-98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. М.: ПМБ ВТИ. 1999. 38 с.
9. Абрамов В.В. и др. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / под общей редакцией В.Я. Путилова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 388 с.
10. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants // Joint Research Centre, 2016, 940 с.
11. Makansi J. Understand system effects when evaluating sorbent injection. Power. 1985. V. 129. № 6. pp. 35–39.
12. Котлер В.Р., Грачев С.П. Комбинированный метод снижения выбросов SO₂ и NO_x тепловых электростанций // Энергохозяйство за рубежом. 1991. № 6.с. 23-25.
13. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 N 47734), 2017. 81 с.
14. Зверева Э.Р., Фаррахов Т.М. Энергоресурсосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах. Под ред. А.Г. Лаптева. М.: «Теплотехник», 2012. 180 с.
15. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахматвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // Теплоэнергетика, 2017. №8. С. 50-56.
16. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. №1. С. 3-9.

Автор публикации

Грибков Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры Тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Air Quality guidelines for particulate matter. Ozone, Nitrogen, Dioxide, Sulfur Dioxide. / Bulletin of the World Health Organization/1211 Geneva 27 Switzerland, 2005, 31 p.
2. Vallero D. Fundamentals of Air Pollution. 4th edition. Elsevier. 2014. 986 p.
3. Sulfur dioxide emissions United States 2019 | Statista / 2021, P. 5 [Electronic resource]: www.statista.com/statistics/501303/volume-of-sulfur-dioxide-emissions-us/.
4. Zroichikov NA, Gribkov AM, Perfiljev AO, et al. Study of the effect of sulfur content in fuel on efficiency and environmental safety of boiler operation in combustion of non-projected fuel. *Alternative Energy and Ecology* № 01-03(249-251). 2018;01-03(249-251):103-117.
5. GOSTR 55173-2012. The Boilerplants. *General technical requirements*. М.: FGUPStandartinform, 2014, 20 p.

6. Directive 2010/75/EU of the European parliament and the council. *Oficisl Journal of the European Union*. L 334/17. 2010.103 p.
7. *Thermal calculation of boilers* (Regulatory method). Edited by C.И. Mothjanet al., St. Petersburg, Publishing House RAO UES of Russia , 1998. 259 p.
8. RD 34.02.305-98. *Methodology for determining the gross emissions of pollutants into the atmosphere from boiler plants of TPPs*. M.: PMBALL-Union Heat Engineering Institute, 1999. 38 p.
9. Abramov B.B, et al. *Modern environmental technologies in the electric power industry: Information collection*. Under the general editorship B.Я. Putilov. M.: Publishing House Moscow Power Engineering Institute, 2007. 388 p.
10. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. *Joint Research Centre*. 2016. 940 p.
11. Makansi J. *Understand system effects when evaluating sorbent injection*. *Power*. 1985;129(6):35–39.
12. Kotler VR, GrachovSP. The combined method of decrease emissionsSO₂ и NO_xthermal power plants. *Energy management abroad*. 1991;6:23-25.
13. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 06.06.2017 N 273 *About the approval of methods of calculations dispersion emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air* (Registered with the Ministry of Justice of Russia 0.08.2017 N 47734), 2017. 81 p.
14. Zvereva ER, Farrachov TM. Energy-saving technologies and devices of thermal power plants when working on fuel oil. Edited by. A.Г. Laptev. M.: Heat engineer. 2012. 180 p.
15. Zvereva ER, Dmitriev AV, Shageev MF and Akhmetvalieva GR. Results of Industrial Tests of Carbonate Additive to Fuel Oil. *Heat and power Engineering*. 2017;8:50-56.
16. Dmitriev AV, Sinurov БЭ, Dmitrieva OC, NguenVu L. Cleaning of gas emissions from boiler plants from solid particles. *News of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems* , 2020;22(1):pp. 3-9.

Author of the publication

Aleksandr M. Gribkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

23 ноября 2020г.

Отредактировано

30 ноября 2020г.

Принято

4 декабря 2020г.



ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Р.Т. Хазиева, М.Д. Иванов

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия
khazievart@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть области применения электромагнитной обработки водных систем. Провести анализ современной литературы, посвященной применению постоянных магнитных полей для обезвоживания водонефтяных эмульсий. Разработать конструкцию устройства для генерации постоянных магнитных полей и выбрать его параметры. Выбрать электрическую схему питания устройства. Определить, как изменяется энергоэффективность устройства с увеличением его габаритных размеров. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялась система трехмерного моделирования КОМПАС-3D, расчет индукции магнитного поля проведен при помощи системы программирования Pascal ABC, выбор оптимальных параметров устройства осуществлен с помощью программы Microsoft Excel. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрено распределение магнитного поля в разрабатываемом устройстве, определены оптимальные параметры конструкции данного устройства и выбрана электрическая схема питания. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Расчеты показали, что коэффициент, учитывающий неоднородное распределение магнитного поля в устройстве, равен 0,883. При помощи системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D построена модель разрабатываемого устройства с учетом полученных соотношений. При использовании схемы с неуправляемым выпрямителем и автотрансформатором мощность, потребляемая устройством, ниже в 2,67 раза, чем мощность, потребляемая устройством, при использовании схемы с управляемым выпрямителем и трансформатором. Энергоэффективность значительно растет с увеличением объемов устройства.

Ключевые слова: постоянное магнитное поле, обезвоживание водонефтяных эмульсий, оптимизация технологического процесса, автотрансформатор, неуправляемый выпрямитель, повышенная энергетическая эффективность.

Для цитирования: Хазиева Р.Т., Иванов М.Д. Выбор оптимальных параметров устройства для генерации постоянного магнитного поля // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 176-187. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-176-187.

SELECTION OF OPTIMUM DEVICE PARAMETERS FOR PERMANENT MAGNETIC FIELD GENERATION

RT. Khazieva, AN. Yashin, MD. Ivanov

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia
khazievart@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the fields of application of electromagnetic treatment of water systems. To analyze the modern literature on the use of constant magnetic fields for dehydration of oil-water emulsions. To develop the design of a device for generating constant magnetic fields and select its parameters. To select the electrical circuit for powering the device. To determine how the energy efficiency of the device changes with an increase in its overall dimensions. METHODS. When solving the problem, the KOMPAS-3D three-dimensional modeling

system was used, the magnetic field induction was calculated using the PascalABC programming system, the optimal device parameters were selected using the Microsoft Excel program. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the distribution of the magnetic field in the device under development, determines the optimal design parameters for this device and selects the electrical power circuit. **CONCLUSION.** Calculations have shown that the coefficient taking into account the inhomogeneous distribution of the magnetic field in the device is 0.883. Using the KOMPAS-3D three-dimensional modeling system, a model of the device under development was built taking into account the obtained relationships. When using a circuit with an uncontrolled rectifier and autotransformer, the power consumed by the device is 2.67 times lower than the power consumed by the device when using a circuit with a controlled rectifier and a transformer. Energy efficiency increases significantly with the increase in device performance.

Key words: constant magnetic field, dehydration of oil-water emulsions, optimization of the technological process, autotransformer, uncontrolled rectifier, increased energy efficiency.

For citation: Khazieva RT, Yashin AN, Ivanov MD. Selection of optimum device parameters for permanent magnetic field generation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):176-187. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-176-187.

Введение и литературный обзор

Электромагнитная обработка водных систем может быть применена для достижения результатов в различных отраслях промышленности: для производства бетона, уменьшения образования накипи, флотационного обогащения полезных ископаемых, сгущения и фильтрации суспензий, а также во многих других целях¹, [1, 2]. В нефтегазовой отрасли данный метод может быть использован для обезвоживания и обессоливания водонефтяных эмульсий. В основе разрушения водонефтяных эмульсий в магнитном поле лежит его воздействие на бронирующие оболочки глобул нефти в воде, заключающееся в разрыхлении бронирующих оболочек на границе нефть – вода, которое происходит из-за перемещения соединений железа в сторону источников магнитного поля [3]. В эмульсиях обратного типа, «вода в нефти», уже капли воды будут растягиваться вдоль силовых линий, испытывая давление окружающей её нефти, при этом толщина бронирующего слоя будет уменьшаться, что способствует процессу обезвоживания [4]. Применение постоянных магнитных полей для интенсификации процесса подготовки нефти упоминается также в [5, 6].

В данной статье рассматриваются параметры устройства для обработки водонефтяной эмульсии в постоянном магнитном поле. Это первый этап процесса обезвоживания. Затем, согласно описанию технологического процесса, производится обработка в импульсном электромагнитном поле, способствующая ускорению процесса коалесценции капель воды, и, как следствие, повышению эффективности процесса обезвоживания [7].

Основной задачей являлось определение оптимальных параметров разрабатываемого устройства, которые обеспечили бы наивысшую энергетическую эффективность процесса, а также выбор схемы управления данным процессом.

Работы, посвященные применению постоянных магнитных полей для обработки водонефтяных эмульсий, начали публиковаться относительно недавно: 20.07.2000 года Велес П.Р., Пивоварова Н.А., Щугорев В.Д., Бердников В.М., Шеламкова О.С., Кульнева И.Н. и Пивоваров А.Т. предложили обрабатывать водный раствор деэмульгатора в омагничивающем устройстве проточного типа, что увеличивало активность деэмульгатора, а при смешении такого раствора деэмульгатора с водонефтяной эмульсией ускоряется коалесценция, и, как следствие, дегидрирование эмульсии [8]. 27.05.2001 года Велес П.Р. и Пивоварова Н.А. разработали магнитный туннель, в котором цилиндрическая конструкция корпуса является одновременно составляющей магнитопровода и местом крепления диаметрально противоположно расположенных внутри него соленоидов, представляющих собой сердечники с катушками, между полюсами которых по диамагнитной трубе протекает обрабатываемая жидкость, обеспечивает высокий коэффициент использования магнитной энергии источников, повышение надежности магнетизатора [9].

В работе [10] подробно изучены существующие методы обезвоживания водонефтяных эмульсий с помощью электродегидраторов и электрокоалесцеров и описаны

¹Класен В.И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1978. 240 с., ил.

их недостатки. В статье [11] показано, что при комбинированном воздействии магнитного поля и деэмульгаторов магнитное поле усиливает действие реагента, и при максимальном значении магнитной индукции приводит к полному обезвоживанию нефти, что доказывает эффективность комбинированного воздействия различных методов обработки водонефтяных эмульсий.

Влияние геометрии устройства на эффективность воздействия электромагнитных полей изучалось также в [12]. Для создания магнитной индукции заданной величины необходимо подавать на витки катушки ток заданной величины. Формирователь тока изучен в работе [13]. Питание разрабатываемого устройства должно осуществляться от источника вторичного электропитания через индуктивно-емкостный преобразователь напряжения, свойства которых изучены в работах [14, 15].

Технической задачей устройства, предлагаемого авторами статьи, является повышение эффективности работы устройства для успешного осуществления глубокого обезвоживания водонефтяной эмульсии.

Поставленная задача достигается тем, что в данном способе обезвоживания водонефтяной эмульсии реализуется комплексное применение постоянного магнитного поля и высокочастотных электромагнитных полей.

Предварительная обработка эмульсии производится в постоянном магнитном поле, в результате чего капли воды в нефти растягиваются вдоль магнитных линий, поскольку компоненты нефти имеют намного более сильную отрицательную магнитную восприимчивость, чем вода. Изменение геометрической формы глобул воды приводит к увеличению площади их поверхности, а следовательно, уменьшению толщины бронирующего слоя, что в дальнейшем облегчает проведение деэмульсации.

Материалы и методы

Объектом исследования является математическая модель распределения магнитного поля в предлагаемом устройстве. Его моделирование было проведено с помощью языка программирования *PascalABC*. На основе результатов моделирования был вычислен коэффициент, учитывающий неоднородность распределения магнитного поля внутри устройства. Затем на основе законов Био-Савара-Лапласа, Ома и Джоуля-Ленца была получена аналитическая зависимость мощности, потребляемой устройством, от его конструктивных параметров. Эта зависимость позволила получить оптимальное соотношение между высотой и радиусом рабочего цилиндра, а также выявить оптимальный диаметр витков катушки, намотанной на цилиндр. Затем были изучены варианты электрической схемы питания устройства и выбрана оптимальная с помощью аналитического анализа и расчетов, проведенных в программе *MicrosoftExcel*. Аналогичным методом была получена зависимость мощности, потребляемой устройством, от его габаритных размеров.

Результаты

Устройство для обработки нефти в постоянном магнитном поле изображено на рис. 1. Устройство представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, состоящий из обечайки, верхнего и нижнего днища, изготовленных из магнитомягкого железа. На обечайку намотаны витки, при протекании тока по которым внутри аппарата возникает постоянное магнитное поле.

Эмульсия подается в верхнюю часть цилиндра. Внутренние стенки снабжены спиралью из диэлектрического материала, который не влияет на распределение магнитного поля внутри устройства, однако обеспечивает движение эмульсии практически перпендикулярно силовым линиям магнитного поля под действием силы тяжести. С помощью угла наклона винтовой линии можно регулировать скорость прохождения эмульсией данного устройства и определять оптимальное время нахождения в постоянном магнитном поле. При этом при пересечении капель воды линий магнитной индукции, на механические примеси, расположенные в этих каплях, действует сила, которая приводит к «разрыхлению» бронирующих оболочек глобул нефти в случае эмульсии типа «нефть в воде», и растяжение капель воды в случае эмульсии типа «вода в нефти».



Рис. 1 устройство для обработки нефти в постоянном магнитном поле

Согласно данным диссертации Вольцова А.А. «Интенсификация процесса расслоения водонефтяных эмульсий путем их магнитно-вибрационной обработки» [2], оптимальным среднеквадратичным значением индукции при обработке в постоянном магнитном поле является 0,03-0,05 Тл. Выберем значение $B=0,05$ Тл для дальнейших расчетов. Тогда напряженность магнитного поля составит $H = 40$ кА/м.

Определим, как соотносится среднеквадратичное значение напряженности магнитного поля и ток в витках обмотки устройства:

На основе закона Био-Савара-Лапласа (1) проведем серию расчетов для построения графиков зависимости распределения магнитной индукции в такой системе от координаты точки:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}. \quad (1)$$

Примем ток в катушке, равный 1 А. В результате компьютерного моделирования, выполненного с использованием языка программирования *PascalABC*, получим следующие зависимости:

При движении точки вдоль оси z' (рис. 2), параллельной продольной оси устройства, поперечная составляющая магнитной индукции (B_x) изменялась согласно рис. 3:

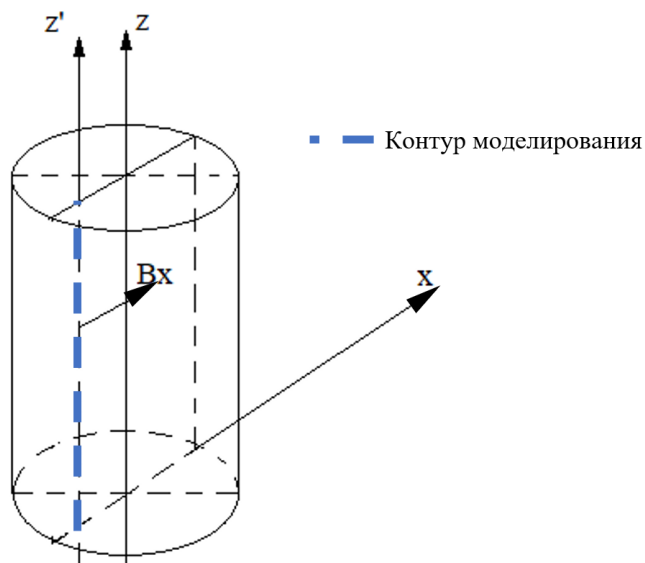


Рис. 2. контур, по которому происходил расчет поперечной составляющей магнитной индукции

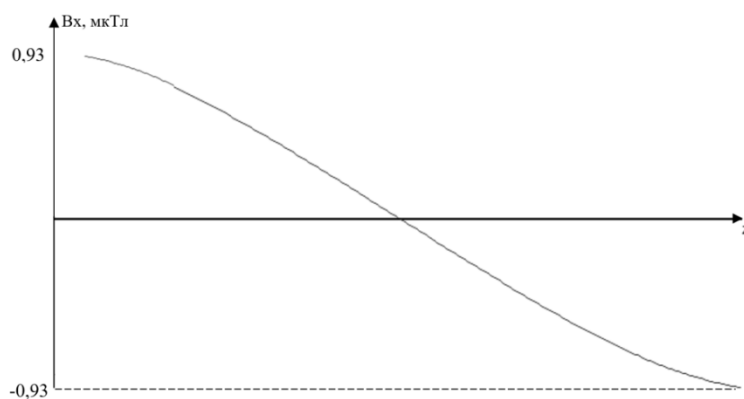


Рис. 3. Зависимость поперечной составляющей магнитной индукции от координаты точки по продольной оси катушки

Из рис. 3 видно, что поперечная составляющая магнитной индукции меняет направление действия при прохождении геометрического центра устройства. Однако её значение по сравнению с продольной составляющей весьма мало, и эту составляющую в дальнейших расчетах можно не учитывать.

Затем было проведено исследование зависимости продольной составляющей магнитной индукции (B_z) от координаты точки по радиальной оси катушки (Ox). При движении точки вдоль оси x (рис. 4), магнитная индукция менялась в соответствии с графиком на рис. 5:

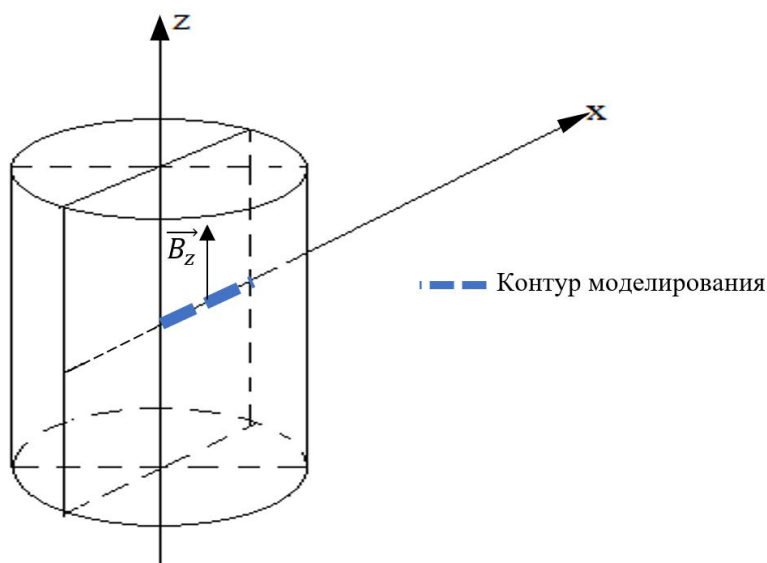


Рис. 4. Контур, по которому происходил расчет продольной составляющей магнитной индукции



Рис. 5. зависимость продольной составляющей магнитной индукции от координаты точки по радиальной оси катушки

Как видим из графика на рис. 5, магнитная индукция вдоль поперечной оси катушки распределена практически равномерно. На участке, расположенном близко к стенкам устройства, магнитная индукция резко возрастает, однако, поскольку этот эффект действует

в основном в области стенок устройства, и не захватывает саму эмульсию, этот рост можно не учитывать.

С учетом вышеизложенных соображений, распределение магнитного поля внутри устройства хорошо иллюстрируется на рис. 7 зависимости индукции магнитного поля от координаты вдоль продольной оси z (рис. 6).

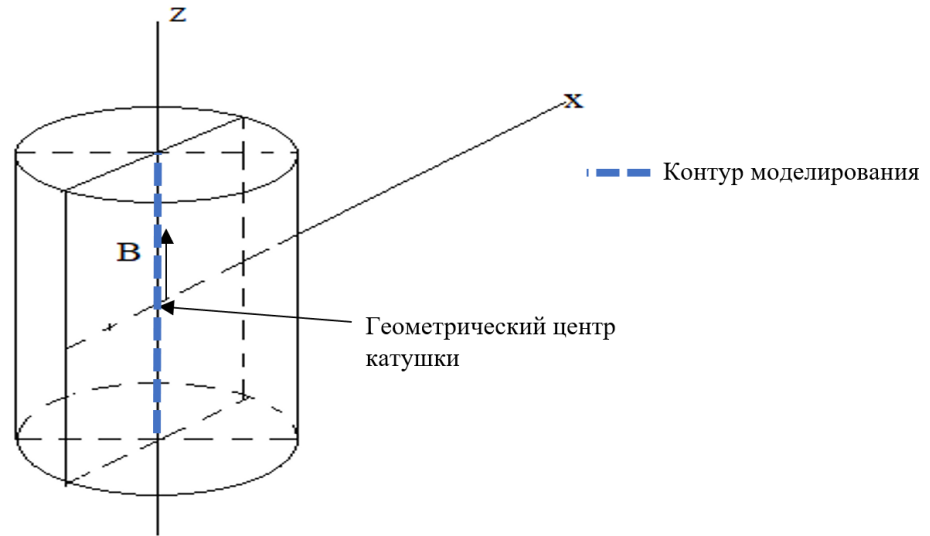


Рис. 6. контур, по которому происходил расчет магнитной индукции

Сопоставим значение индукции в геометрическом центре катушки (рис. 6) с значением, рассчитанным теоретически (формула (2)):

$$B_{max} = \frac{\mu_0 NI}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 300 \cdot 1}{2 \cdot 0,3} (\cos 45^0 - \cos 135^0) = 0,00089 \text{ Тл}, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – углы, под которыми видны края катушки из её центра. Учитывая, что $h=2r$ (данное соотношение было использовано для компьютерного моделирования) имеем $\alpha_1 = 45^0$, $\alpha_2 = 135^0$ соответственно. Сопоставив результаты теоретического расчета и моделирования, убеждаемся в корректности работы модели.

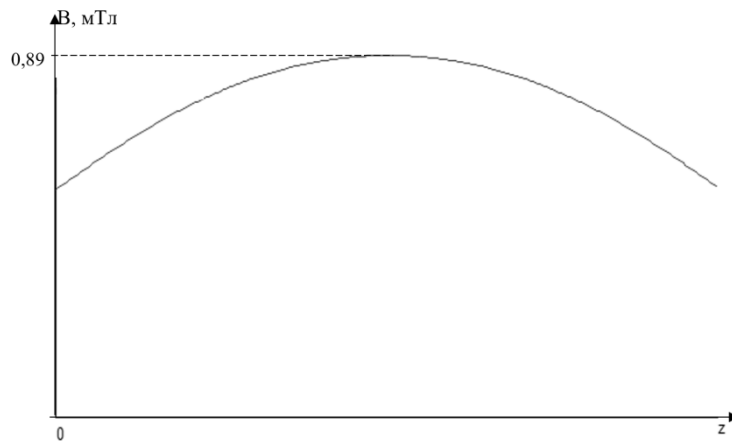


Рис. 7. Зависимость индукции магнитного поля от координаты вдоль продольной оси z

По графику на рис. 7 несложно определить и среднеквадратичное значение магнитной индукции во всех точках внутри катушки. Это значение примерно будет равно среднеквадратичному значению магнитной индукции в точках, расположенных на оси Oz (формула (3)), так как поперечной составляющей магнитной индукции можно пренебречь согласно данным рис. 3, а при распределении вдоль радиальной оси значение индукции также остается постоянным согласно рис. 5.

$$B_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{h} \int_0^h B^2 dz} = 0,000785 \text{ Тл}. \quad (3)$$

Максимальное значение индукции, согласно формуле (2), определяется током, протекающим по виткам катушки. Для определения тока и мощности, потребляемого устройством, необходимо перейти в расчетных формулах от максимального значения индукции к среднеквадратичному. Для этого введем коэффициент, учитывающий неоднородное распределение магнитного поля в устройстве:

$$k = \frac{B_{\text{ср.кв.}}}{B_{\text{max}}} = \frac{0,000785}{0,00089} = 0,883;$$

Оптимизируем параметры устройства таким образом, чтобы потребляемая мощность стремилась к минимуму при неизменном среднеквадратичном значении магнитной индукции. Для этого выведем общую формулу зависимости потребляемой мощности от параметров устройства: N – числа витков, d – диаметра провода, h – высоты цилиндра и r – его радиуса:

$$P = \frac{8B_{\text{ср.кв.}}^2 \rho}{(k\mu\mu_0)^2} \cdot \frac{(h^2 + 4r^2)r}{Nd^2};$$

Учтем, что $h \approx 1,05Nd$, тогда:

$$P = \frac{8,4B_{\text{ср.кв.}}^2 \rho}{(k\mu\mu_0)^2} \cdot \frac{(h^2 + 4r^2)r}{hd}; \quad (4)$$

Проанализируем полученное выражение. Потребляемая мощность зависит от:

- 1) среднеквадратичного значения магнитной индукции, коэффициента распределения магнитной индукции, удельного сопротивления меди и магнитной проницаемости эмульсии – параметров, которые нельзя изменить в данном выражении;
 - 2) обратно пропорциональна диаметру витков;
 - 3) зависит сложным образом от геометрических размеров катушки.
- Определим оптимальные параметры h и r :

$$h = \frac{V}{\pi r^2}; \quad (5)$$

С учетом (5), продифференцируем выражение (4) по r и определим оптимальное значение радиуса устройства, при котором потребление активной мощности из сети будет минимально:

$$r = \sqrt[6]{\frac{V^2}{20\pi^2}};$$

При объёме установки 5 л (в лабораторных условиях), радиус цилиндра, в котором происходит воздействие постоянным магнитным полем, составит:

$$r = \sqrt[6]{\frac{0,005^2}{20\pi^2}} = 0,071 \text{ м};$$

Тогда высота цилиндра составит с учетом (5):

$$h = \frac{V}{\pi r^2} = r\sqrt{20} = 0,071\sqrt{20} = 0,317 \text{ м}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) видно, что разрабатываемое устройство должно иметь такую форму, что её высота превышает радиус примерно в 4,47 раза.

Возможно 2 основных способа подключения установки к питающей сети: с использованием трансформатора и управляемого выпрямителя, или с использованием автотрансформатора и неуправляемого выпрямителя. В первом случае регулирование значения выпрямленного напряжения осуществляется с помощью изменения значения угла отпирания тиристоров, а во втором – с помощью изменения числа витков вторичной обмотки автотрансформатора. Рассмотрим, какой из данных способов обеспечит более высокую энергоэффективность процесса.

Расчет схемы с управляемым выпрямителем и трансформатором

Рассчитаем параметры понижающего трансформатора и выпрямителя.

Поскольку в ходе экспериментов будет необходимо изменять значение индукции магнитного поля, выберем управляемый выпрямитель, в котором можно будет регулировать выходное напряжение.

Наиболее предпочтительной схемой однофазного выпрямителя является несимметричная мостовая схема управляемого выпрямителя, в которой два поперечных плеча моста выполнены на неуправляемых вентильях (диодах), а два других – на управляемых вентильях (тиристорах). Эта схема обладает также повышенным коэффициентом мощности, лучшей регулировочной характеристикой и более простой схемой управления тиристорами выпрямителя (рис. 8).

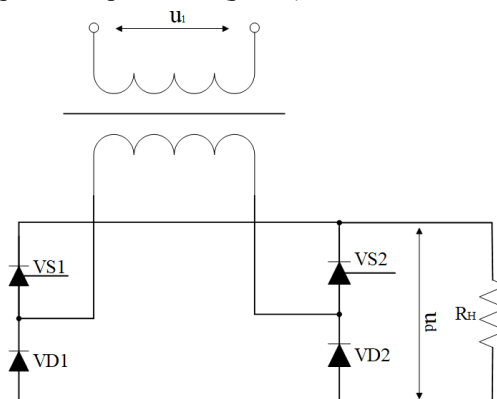


Рис. 8 – схема управляемого выпрямителя

Выберем значение угла регулирования $\alpha_p = 25^\circ$, напряжения короткого замыкания 4,5% и проведем расчет основных параметров схемы питания для установки объемом 5 л при различных диаметрах обмоточного провода. Среднее падение напряжения на силовом диоде составляет 1,5 В, а на тиристоре – 20 В², что негативно сказывается на КПД установки, поскольку полезная мощность пропорциональна напряжению U_d , так как ток, потребляемый устройством, должен оставаться постоянным согласно требованиям технологического процесса. То есть, увеличение энергоэффективности предполагает увеличение диаметра обмоточного провода (по формуле (4)), что приводит к уменьшению сопротивления, а в результате – напряжения U_d . При низких значениях U_d КПД установки также сильно падает, что ведет к увеличению потребления мощности из сети. Согласно теоретическим расчетам, затраченная мощность P_1 будет минимальна, если падение напряжение в выпрямителе будет равно падению напряжения на выводах устройства для создания постоянного магнитного поля, то есть при КПД = 50%. Это подтверждается таблицей 1, приведенной ниже:

Таблица 1

Зависимость КПД и мощности установки объемом 5л от сечения обмоточного провода

Сечение s , мм ²	Диаметр провода d , мм	Число витков N	Напряжение U_d , В	Ток I , А	Полезная мощность P_2 , Вт	КПД η	Затраченная мощность P_1 , Вт
0,5	0,80	397	236,71	39,37	9318,30	0,92	10164,66
0,75	0,98	324	157,81	48,21	7608,65	0,88	8645,27
1	1,13	281	118,36	55,68	6590,51	0,85	7787,71
1,2	1,24	256	98,63	61,01	6017,08	0,82	7328,73
1,5	1,38	229	78,90	68,19	5380,47	0,79	6846,56
2	1,60	199	59,18	78,73	4659,15	0,73	6351,87
2,5	1,78	178	47,34	88,04	4168,05	0,69	6060,92
3	1,95	162	39,45	96,46	3805,50	0,65	5879,37
4	2,26	140	29,59	111,37	3295,25	0,58	5689,66
5	2,52	126	23,67	124,49	2946,84	0,52	5623,38
6	2,76	115	19,73	136,44	2691,41	0,48	5624,87
8	3,19	99	14,79	157,46	2329,57	0,41	5715,02
10	3,57	89	11,84	176,08	2084,02	0,36	5869,77
16	4,51	70	7,40	222,74	1647,63	0,26	6436,43

²Выпрямительные преобразователи силовой электроники электропривода. Учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы по дисциплине «Силовая электроника» для студентов направления подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.

25	5,64	56	4,73	278,72	1319,51	0,18	7311,92
35	6,68	47	3,38	329,87	1115,50	0,14	8207,78
50	7,98	40	2,37	393,85	932,30	0,10	9400,17
70	9,44	34	1,69	466,75	789,17	0,07	10824,23
95	11,00	29	1,25	542,92	676,39	0,05	12349,11
120	12,36	26	0,99	610,78	602,41	0,04	13734,22
150	13,82	23	0,79	682,80	538,75	0,04	15218,85
185	15,35	21	0,64	759,03	485,60	0,03	16804,74
240	17,48	18	0,49	863,87	426,02	0,02	18999,18
300	19,54	16	0,39	965,19	380,78	0,02	21132,28
400	22,57	14	0,30	1116,86	330,47	0,01	24342,91

Видим, что оптимальным сечением обмоточного провода будет являться 5 мм^2 , при этом мощность, потребляемая из сети, минимальна, а напряжение U_d максимально приближено к $21,5 \text{ В}$ – падению напряжения в ветви выпрямителя.

Расчет схемы с неуправляемым выпрямителем и автотрансформатором

Основным преимуществом такой схемы является отсутствие тиристоров, падение напряжения на которых в прямом направлении в среднем составляет 20 В .

Пересчитаем таблицу 1 с учетом, что в схеме неуправляемого выпрямителя тиристоры заменены диодами:

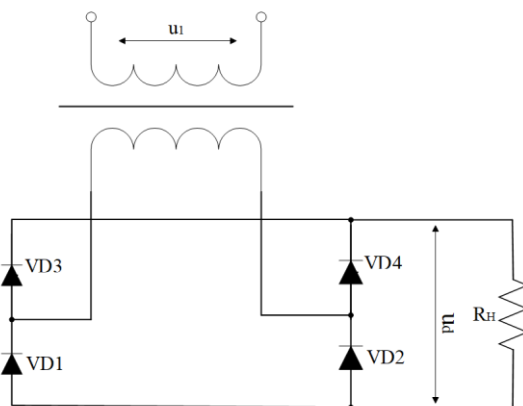


Рис. 9. схема неуправляемого выпрямителя

Таблица 2

Зависимость КПД и мощности установки объемом 5л от сечения обмоточного провода в схеме с неуправляемым выпрямителем

Сечение s , мм^2	Диаметр провода d , мм	Число витков N	Напряжение U_d , В	Ток I , А	Полезная мощность P_2 , Вт	КПД η	Затраченная мощность P_1 , Вт
0,5	0,80	397	236,71	39,37	9318,30	0,99	9436,40
0,75	0,98	324	157,81	48,21	7608,65	0,98	7753,29
1	1,13	281	118,36	55,68	6590,51	0,98	6757,56
1,2	1,24	256	98,63	61,01	6017,08	0,97	6200,10
1,5	1,38	229	78,90	68,19	5380,47	0,96	5585,04
2	1,60	199	59,18	78,73	4659,15	0,95	4895,34
2,5	1,78	178	47,34	88,04	4168,05	0,94	4432,17
3	1,95	162	39,45	96,46	3805,50	0,93	4094,88
4	2,26	140	29,59	111,37	3295,25	0,91	3629,36
5	2,52	126	23,67	124,49	2946,84	0,89	3320,31
6	2,76	115	19,73	136,44	2691,41	0,87	3100,73
8	3,19	99	14,79	157,46	2329,57	0,83	2801,96
10	3,57	89	11,84	176,08	2084,02	0,80	2612,27
16	4,51	70	7,40	222,74	1647,63	0,71	2315,83
25	5,64	56	4,73	278,72	1319,51	0,61	2155,66
35	6,68	47	3,38	329,87	1115,50	0,53	2105,12
50	7,98	40	2,37	393,85	932,30	0,44	2113,86
70	9,44	34	1,69	466,75	789,17	0,36	2189,41

95	11,00	29	1,25	542,92	676,39	0,29	2305,15
120	12,36	26	0,99	610,78	602,41	0,25	2434,76
150	13,82	23	0,79	682,80	538,75	0,21	2587,14
185	15,35	21	0,64	759,03	485,60	0,18	2762,69
240	17,48	18	0,49	863,87	426,02	0,14	3017,62
300	19,54	16	0,39	965,19	380,78	0,12	3276,34
400	22,57	14	0,30	1116,86	330,47	0,09	3681,04

Видим, что в схеме с неуправляемым выпрямителем при объеме установки 5 л при оптимальных габаритных размерах и правильном выборе сечения обмотки мощность, подаваемая на выпрямитель, должна составлять порядка 2,1 кВт. Также заметим, что затрачиваемая мощность будет наименьшей при КПД, составляющем 50%, что также подтверждается теоретическими расчетами. При этом, по сравнению с питанием от управляемого выпрямителя, установка становится эффективнее в несколько раз: для обезвоживания одного и того же объема эмульсии потребляемая энергия будет ниже в 2,67 раза. Расчетная мощность автотрансформатора составит всего лишь 2,5 кВт.

Если построить похожую таблицу для установки объемом 20 л, обнаружим, что в этом случае потребляемая мощность составит порядка 3,3 кВт, а для установки объемом 100 л – 5,7 кВт. Таким образом, установка промышленного образца будет обладать гораздо более высокой энергетической эффективностью.

Обсуждение результатов

В ходе исследований были получены следующие результаты:

- 1) Определено распределение постоянного магнитного поля внутри разрабатываемого устройства;
- 2) Определен коэффициент, учитывающий неоднородное распределение магнитного поля в устройстве: $k=0,883$;
- 3) Определена оптимальная геометрическая форма: $h=r\sqrt{20}$, где h – высота цилиндра, в котором происходит магнитная обработка, а r – его радиус;
- 4) Проведено сравнение схем питания устройства. В результате аналитического анализа и расчетов выявлено, что схема с автотрансформатором и неуправляемым выпрямителем обладает наибольшей энергоэффективностью. Так, для установки объемом 5 л, потребляемая энергия для данной схемы будет в 2,67 раза ниже, чем для схемы с трансформатором и управляемым выпрямителем;
- 5) Были рассчитаны мощности, потребляемые из сети, для установок различных объемов. В результате определено, что энергоэффективность значительно растёт с увеличением производительности устройства. Таким образом, производственная модель устройства будет обладать эффективностью гораздо выше, чем лабораторная.

Заключение

В ходе исследований были получены результаты, необходимые для конструирования экспериментальной установки для обезвоживания водонефтяной эмульсии. Были определены оптимальные геометрические размеры устройства, оптимальная электрическая схема питания, а также были рассчитаны мощности, потребляемые из сети, для установок различных объемов. В результате определено, что энергоэффективность значительно растёт с увеличением производительности устройства. Данные исследования позволят сконструировать лабораторную установку для проведения серии экспериментов по обезвоживанию водонефтяной эмульсии с этапом предварительной подготовки в постоянном магнитном поле.

Литература

1. Рунов Д.М., Лаптев А.Г. Электромагнитная обработка воды в системе оборотного водоснабжения // Научно-практический рецензируемый журнал «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ», №1-2 (2015). С. 18-25.
2. Кашаев Р.С. Подготовка водотопливных эмульсий во вращающихся магнитном и неоднородном электрическом полях с контролем процесса методом ЯМР-релаксометрии // Научно-практический рецензируемый журнал «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ». 2016. №1-2. С. 20-26.
3. Вольцов А.А. Интенсификация процесса расслоения водонефтяных эмульсий путем их магнитно-вибрационной обработки. Канд.диссертация. Уфа: УГНТУ. 2006. 122 с.
4. Ермеев А.М., Елпидинский А.А. О применении магнитного поля в процессах разрушения водонефтяных эмульсий. В журнале «Вестник Казанского технологического университета», 2013. Т. 16. № 2. С. 170-174.

5. Ибрагимов Н.Г., Судыкин А.Н., Сахабутдинов Р.З., и др. Технологии и методы интенсификации процесса подготовки высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. 2016. № 7. С. 61–63.
6. Золфагари Р., Фахру'л-Рази А., Абдулла Л.С. и др., Методы деэмульгирования эмульсий вода в нефти и нефть в воде в нефтяной промышленности, *Sep. Purif. Technol.*, 2016. Т. 170. С. 377–407.
7. Иванов М.Д., Конесев С.Г. Генератор импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяной эмульсии. Статья в сборнике «Материалы 71-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. В 2 т. / отв. ред. Р.У. Рабаев. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. 572 с.
8. Велес П.Р., Пивоварова Н.А., Щугорев В.Д., Бердников В.М., Шеламкова О.С., Кульнева И.Н., Пивоваров А.Т. Способ обезвоживания водонефтяной эмульсии. Патент 2 152 817 (РФ) от 20.07.2000, МПК В01Д 17/06.
9. Швецов В.Н., Юнусов А.А. Магнитный туннель. Патент 2 167 824 (РФ) от 27.05.2001, МПК C02F 1/48.
10. Новая энергоэффективная технология и техника электродеэмульсации нефти на основе применения композитных электродов // Научно-практический рецензируемый журнал «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ». 2018. Т. 20. № 3-4. С. 54-61.
11. Шейх-Али А.Д. Комбинированное воздействие магнитного поля и деэмульгаторов на процесс обезвоживания нефти // Подготовка нефти и газа. 2018. № 1. С. 76-80.
12. Таваколи М.Н., Оджаги А., Мохаммади-Манеш Э., и др. Влияние геометрии катушки на процесс индукционного нагрева в системах выращивания кристаллов // Журнал выращивания кристаллов, 2009. Т. 311. № 6.
13. Кит К.Сум. Усовершенствованный формирователь тока с пассивной коррекцией коэффициента мощности с заполнением впадин, приближенный к пределам спецификации IEC / PCIM Magazine, февраль 1998 г.
14. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Индуктивно-емкостные преобразователи для вторичных высоковольтных источников питания // Международная мультikonференция по промышленной инженерии и современным технологиям. Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. FarEastCon, стр. 1-5. doi: 10.1109 / FarEastCon.2019.8934018.
15. Конесев С. Г., Хазиева Р. Т., Кириллов Р. В., и др. Исследование стабилизирующих свойств индуктивно-емкостных преобразователей на основе гибридных электромагнитных элементов», *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2017. V.803. doi: 10.1088 / 1742-6596 / 803/1/012076.

Авторы публикации

Хазиева Регина Тагировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехники и электрооборудования предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Иванов Максим Дмитриевич – студент, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

References

1. Runov DM, Laptev AG. Electromagnetic water treatment in the circulating water supply system. *Scientific and practical peer-reviewed journal Izvestiya vysshikh uchebnykh zavadenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2015;1-2:18-25.
2. Kashaev RS. Preparation of water-fuel emulsions in rotating magnetic and non-uniform electric fields with process control by NMR-relaxometry. *Scientific and practical peer-reviewed journal Izvestiya vysshikh uchebnykh zavadenii PROBLEMY ENERGETIKI* " 2016;1-2:20-26.
3. Voltsov AA. Intensification of the process of stratification of oil-water emulsions by means of their magnetic vibration treatment. Candidate dissertation. Ufa: USPTU. 2006. 122 p.
4. . Ermeev AM, Elpidinsky AA. On the use of a magnetic field in the processes of destruction of water-oil emulsions. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013;16(2):170-174.
5. Ibragimov NG, Sudykin AN, Sakhabutdinov RZ, et al. Technologies and methods of intensification of the process of preparation of high-viscosity oil. *Oil industry*. 2016;7:61-63.
6. Zolfagari R, Fakhru'l-Razi A, Abdulla LS. et al. Methods for demulsifying water-in-oil and oil-in-water emulsions in the petroleum industry. *Sep. Purif. Technol.* 2016;170:377–407.
7. Ivanov M.D, Konesev SG. *Generator of pulsed electromagnetic field for dehydration of oil-water emulsion. An article in the collection Materials of the 71st Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists of USPTU. 2 tons / hole ed. RU. Rabaev. Ufa: USPTU Publishing House, 2020. 572 p.*

8. Veles PR, Pivovarov NA, Shchugorev VD, Berdnikov VM, Shelamkova OS, Kulneva IN. and Pivovarov AT. *Method of dehydration of water-oil emulsion*. Patent 2 152 817 (RF) dated 20.07.2000, IPC B01D 17/06.

9. Veles PR, Pivovarov NA. *Magnetic tunnel*. Patent 2 167 824 (RF) dated 27.05.2001, IPC C02F 1/48. Magnetic tunnel.

10. Shvetsov VN, Yunusov AA. New energy-efficient technology and technique of oil electrodeemulsification based on the use of composite electrodes // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavadenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2018;20,3-4:54-61.

11. Sheikh-Ali A.D. Combined effect of magnetic field and demulsifiers on the process of oil dehydration. *Oil and Gas Preparation*. 2018;1:76-80.

12. Tavakoli MH, Ojagi A, Mohammadi-Manesh E, et al. The influence of coil geometry on the process of induction heating in crystal growing systems. *Journal of growing crystals*. 2009,311:6.

13. Keith Sum. K. Enhanced cavity filling passive power factor correction current driver, close to IEC. PCIM Magazine specification limits, February 1998

14. Konesev SG, Khazieva RT, Kirillov RV. Inductive-capacitive converters for secondary high-voltage power supplies. *International Multiconference on Industrial Engineering and Modern Technologies*, 2019. Institute of Electrical and Electronic Engineers, FarEastCon, pp. 1-5. doi: 10.1109 / FarEastCon.2019.8934018.

15. Konesev SG., Khazieva RT., Kirillov RV, et al. Investigation of the stabilizing properties of inductive-capacitive converters based on hybrid electromagnetic elements. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2017. V. 803. doi: 10.1088 / 1742-6596 / 803/1/012076.

Authors of the publication

Khazieva R. Tagirovna – Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia.

Ivanov M. Dmitrievich – Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia.

Получено

13 ноября 2020г.

Отредактировано

11 декабря 2020г.

Принято

14 декабря 2020г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 620.19

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

Р.З. Шакурова, С.О. Гапоненко, А.Е. Кондратьев

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
shakurova.rz@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы надежности трубопроводных систем ЖКХ. Провести анализ существующих методов оценки технического состояния трубопроводов. Разработать усовершенствованную методику, позволяющую производить поиск различных типов дефектов в трубопроводах. Разработать устройство инерциального возбуждения низкочастотных диагностических вибрационных колебаний. Разработать программное обеспечение в среде LabVIEW для сбора, хранения и обработки сигналов, регистрируемых с помощью чувствительного элемента (пьезоэлектрического датчика), устанавливаемого на трубопроводе. Провести серию экспериментальных исследований для проверки предложенной методики. *МЕТОДЫ.* Для возбуждения колебаний в исследуемом трубопроводе применялся метод инерциального возбуждения колебаний. Для поиска собственных частот колебаний исследуемого трубопровода применялись методы математического моделирования, реализуемые в программном комплексе ANSYS. При проведении экспериментов для обработки сигналов, регистрируемых с помощью чувствительного элемента (пьезоэлектрического датчика), использовался метод быстрого преобразования Фурье. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье представлена методика оценки технического состояния трубопроводов, а также устройство инерциального возбуждения колебаний. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на трубопроводе из стеклопластика, результаты показали, что при прохождении колебательной волны через стенку бездефектного трубопровода её амплитуда меняется незначительно. В случае наличия дефекта амплитуда колебаний будет значительно слабее за счёт рассеивания колебательной энергии в месте дефекта. Таким образом, по степени ослабления амплитуды сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах.

Ключевые слова: *повышение надежности, возбуждение колебаний, инерциальный резонатор, свободные колебания, спектр колебаний.*

Для цитирования: Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 188-201. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201.

TECHNIQUE FOR OPERATIONAL DIAGNOSIS OF PIPELINES OF ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

RZ Shakurova, SO Gaponenko, AE Kondratiev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
shakurova.rz@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the problems of reliability of pipeline systems of housing and communal services. To analyze existing methods for assessing the technical condition of pipelines. To develop an improved technique that allows you to search for various types of defects in pipelines. To develop a device for inertial excitation of low-frequency diagnostic vibration vibrations. To develop software in the LabVIEW environment for collecting, storing and processing signals from a sensitive sensor (piezoelectric sensor) installed on a pipeline. To conduct a series of experimental studies to test the proposed methodology. *METHODS.* The method of inertial excitation of vibrations was used to excite vibrations in the wall of the investigated pipeline. To search for the natural frequencies of vibrations of the pipeline under study, mathematical modeling methods were used, implemented in the ANSYS software package. During the experiments, the fast Fourier transform method was used to process the signals coming from the piezoelectric sensor. *RESULTS.* The article presents a technique for assessing the technical condition of pipelines, as well as a device for inertial excitation of vibrations. The article presents the results of experimental studies on a fiberglass pipeline, the results showed that when an oscillatory wave passes through the wall of a defect-free pipeline, its amplitude changes insignificantly. If there is a defect in the wall of the investigated pipeline, the vibration amplitude will be much weaker due to the dissipation of vibrational energy in the place of the defect. Thereby, it is possible to determine not only the presence of a defect, but also its size by the degree of attenuation of the signal amplitude. *CONCLUSION.* The proposed technique is the basis for the creation of a new measuring and diagnostic complex for vibration control of pipelines.

Keywords: increased reliability, excitation of vibrations, inertial resonator, free vibrations, vibration spectrum.

For citation: Shakurova RZ, Gaponenko SO, Kondratiev AE. Technique for operational diagnosis of pipelines of energy systems and complexes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):188-201. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201.

Введение

Энергетика является одной из фундаментальных отраслей российской экономики. Это обусловлено тем, что все технологические процессы в промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте и во всех сферах обслуживания населения связаны с большими затратами энергии. В этой связи уделяется большое внимание надежности энергосистемы и безопасной эксплуатации энергетических объектов.

Регулирование вопросов, касающихся надежной и безопасной эксплуатации производственных объектов и направленных на предупреждение аварий, и опасных ситуаций в производственных процессах осуществляется Федеральным законом №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 [1,2]. Кроме того, безаварийная эксплуатация оборудования и трубопроводов промышленных объектов обеспечивает экологическую безопасность и санитарно-эпидемиологическое благополучие населения, предписываемые Федеральным законом №170-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г., Федеральным законом №7-ФЗ «Об охране окружающей природной среды» от 10.01.2002 г. [3,4]

В настоящее время проблема износа объектов коммунальной инфраструктуры и их технологическая отсталость стоит очень остро. Общий износ сетей составляет порядка 70%, что приводит к высокой аварийности и потере воды, тепла, электричества в процессе производства и транспортировки до потребителей. Кроме того, подобные аварии несут за собой большие материальные затраты, значительный вред экологии, а порой и человеческие жертвы [5].

Из-за износа тепловых сетей и теплофикационного оборудования теплоноситель

подаются потребителям не в соответствии с расчетным температурным графиком, что ведет к дополнительным расходам на транспортировку объемов недогретого теплоносителя. В связи с этим снижается эффективность использования энергетических ресурсов, и говорить об энергосбережении не приходится. Согласно федеральному закону Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», необходимо снижать потребление топливно-энергетических ресурсов и стремиться к рациональному использованию тепловой и электрической энергии [6]. Одним из направлений повышения энергетической эффективности является обеспечение надёжного функционирования энергетических систем, так как именно здесь теряется большая часть энергии: на стадии производства тепловой и электрической энергии ввиду несовершенства технологий производства и оборудования энергетических систем, во время транспортировки тепловой энергии потребителю ввиду обветшания трубопроводных систем, а также потери энергии у потребителя ввиду её нерационального использования [7].

Все эти трудности в большей или меньшей степени характерны для предприятий энергетической отрасли России. По-прежнему преобладает расточительный характер потребления энергоресурсов. Отсутствует какая-либо система эффективных методов экономического стимулирования энергосбережения.

В этой связи для обеспечения надежной работы энергосистемы и, как следствие, бесперебойного снабжения потребителей тепловой энергией, необходимо уделять особое внимание техническому состоянию энергетического оборудования как на самих станциях и котельных, так и при транспортировке тепловой энергии до потребителя [8,9].

В настоящее время для диагностики энергетического оборудования применяют различные методы неразрушающего контроля, в том числе такие методы как:

- визуальный и измерительный контроль;
- капиллярная дефектоскопия;
- магнитный метод контроля;
- рентгеновский контроль;
- ультразвуковой контроль.

Вкратце остановимся на каждом из перечисленных методов.

Визуальный контроль — древнейший метод неразрушающего контроля. Все мероприятия до неразрушающего контроля начинаются именно с визуального осмотра объекта контроля. Данный метод основан на исследовании объекта невооруженным глазом. Визуальная оценка объекта контроля часто проводится с помощью самых простых измерительных средств: лупы, измерительные линейки, угломеры, щупы, штангенциркули, универсальные шаблоны сварщика (УШС) и др. Визуальный контроль является самым доступным методом контроля, при этом он оперативен и достаточно информативен, однако этот метод имеет низкую чувствительность (при остроте зрения 1 чувствительность составляет 0,1мм), низкую вероятность обнаружения мелких дефектов, а достоверность результатов визуального осмотра зависит от остроты зрения специалиста, его усталости и условий проведения контроля [10].

Капиллярная дефектоскопия – метод НК, позволяющий выявлять поверхностные и сквозные дефекты, определять их протяженность, расположение и ориентацию на поверхности. Капиллярный контроль основан на проникновении пенетрантов - специальных жидкостей - в поверхностные дефекты изделия под действием капиллярного давления и последующей регистрации индикаторных следов [10].

Капиллярный метод контроля обладает следующими преимуществами

- простота операций;
- доступность оборудования и материалов;
- широкий спектр применения;
- возможность определения расположения дефекта, его размеров, глубины и формы.

Однако данный метод имеет и ряд недостатков:

- большая длительность процесса контроля (порядка 2 часов);
- необходимость тщательной предварительной подготовки объекта контроля;
- обнаружение только поверхностных дефектов;
- сложность автоматизации процесса, следовательно, высокая его трудоемкость;
- если контроль проводится при отрицательных температурах, точность исследований сильно снижается.
- некоторые дефектоскопические материалы вредны для человека, следовательно,

возникает необходимость использования средств защиты.

В основе магнитного метода неразрушающего контроля лежит изменение направления линий магнитного потока при прохождении через участки с пониженной магнитной проницаемостью, которыми являются разрывы сплошности металла. Магнитная дефектоскопия применима для выявления дефектов в ферромагнитных металлах, таких как никель, железо, кобальт и сплавы на их основе.

Магнитный метод контроля имеет ряд преимуществ: высокая чувствительность, определение размеров и формы дефектов, простота реализации и относительная дешевизна [11]. Также можно выделить и ряд недостатков: вероятность фиксации ложных сигналов на ферромагнитной ленте при наличии неровностей металла, а также данный метод имеет низкую чувствительность к выявлению широких и округлых дефектов.

Рентгеновский контроль применяют для определения целостности металла, выявления шлаковых, окисных и других включений в структуре металла. Генерируемые лампой рентгеновские лучи проходят через исследуемый участок объекта контроля и фиксируются на различных светочувствительных материалах – пленке, бумаге или пластине, расположенных за объектом контроля. После проведения контроля светочувствительные пленки проявляют и расшифровывают с помощью негатоскопа.

Рентгеновский метод контроля позволяет выявлять и определять расположение как поверхностных, так и скрытых подповерхностных дефектов, обладает высокой информативностью и наглядностью результатов исследования, при этом скорость процесса дефектоскопии достаточно высокая. К существенным недостаткам метода можно отнести опасность рентгеновского излучения для здоровья человека, высокая цена исследований и низкая чувствительность к некоторым видам дефектов.

Впервые разработкой ультразвукового метода [12] дефектоскопии занялся советский ученый Соколов С.Я. Сама методика была разработана и апробирована им в 1928-1930 годах, а в 1948 году Соколов разработал первый в России импульсный эхо-дефектоскоп. Также большой вклад в исследование распространения и отражения ультразвуковых волн внес ученый Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения Ермолов И.Н. Сущность ультразвукового метода заключается в излучении в объект контроля акустических колебаний и в последующем принятии их отражений специальным прибором – дефектоскопом с пьезоэлектрическим датчиком. Принцип контроля состоит в том, что УЗК волны не меняют своей траектории, проходя через однородную среду, однако при попадании на границу двух материалов с различной звуковой проницаемостью, волны преломляются и отражаются. Именно отраженные волны и фиксируются дефектоскопом, а анализ их параметров позволяет выявлять форму, глубину и размеры дефекта.

Основными достоинствами ультразвуковой дефектоскопии являются его относительная дешевизна, высокая скорость и точность измерений, портативность используемого для дефектоскопии оборудования. Среди недостатков стоит выделить невозможность определения реальных размеров дефекта, подготовка поверхности контроля к проведению дефектоскопии (очистка от загрязнений и окалины), а также трудности при работе с металлом крупнозернистой структуры [13].

Таким образом, применяемые в настоящее время средства технической диагностики, основанные на методах неразрушающего контроля, в большинстве случаев позволяют с достаточной точностью определить тип дефекта, его местоположение и размеры [14-17]. Однако каждый из перечисленных выше методов позволяет выявлять дефекты определенного типа, либо методы применимы только к объектам контроля, выполненным из металла. В этой связи можно сказать, что применяемые методы и средства технического диагностирования не являются универсальными, поэтому на практике для определения технического состояния оборудования энергетических систем применяют сразу несколько методов диагностики, каждый из которых позволяет выявлять дефекты определенного типа. Вместе с тем, такой подход сильно усложняет процесс диагностирования, увеличивает его сроки и стоимость.

В этой связи необходим жёсткий контроль и регулярный мониторинг технического состояния оборудования и трубопроводов энергетических систем.

Материалы и методы

Для оценки технического состояния трубопроводов разработана универсальная методика и устройство для поиска различных дефектов, как поверхностных, так и внутренних, при этом данная методика позволяет диагностировать трубопроводы, состоящие из любых материалов.

Предлагаемая методика основана на методе колебаний [18], согласно которому параметры колебаний, возбуждаемых в объекте контроля, изменяются при наличии дефекта в его структуре.

Методика контроля технического состояния трубопроводов включает в себя следующие этапы:

1. Возбуждение колебаний в объекте контроля с помощью инерциального резонатора.

2. Съём колебаний с помощью чувствительного элемента, который может выполнен в виде пьезоэлектрического датчика, микрофона или лазерного пьезодатчика.

3. Запись колебаний, снятых чувствительным элементом в программном обеспечении, разработанном в среде программирования LabVIEW.

4. Преобразование записанных колебаний в спектр и его дальнейший анализ с целью выявления наличия дефекта.

5. Повтор измерений на других частотах.

Для возбуждения колебаний в трубопроводе разработан способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке [19].

Данное изобретение относится к области неразрушающих методов контроля, а именно к вибрационной диагностике и может быть использовано для анализа технического состояния трубопроводов.

В настоящее время известны различные способы генерации колебаний, регистрации колебаний и разделения их на компоненты. К примеру, известен способ по описанию изобретения к авторскому свидетельству SU № 1516800 А1, МПК G01H 17/00, 18.02.1988, заключающийся в том, что устанавливают регистрационный датчик колебаний в контрольной точке на испытуемом изделии, подвергают изделие вибрационной нагрузке и регистрируют его колебаний в контрольной точке. Недостатками данного способа являются регистрация только изгибных и крутильных колебаний, а также невозможность применения к упругим оболочкам, а именно область применения данного способа ограничивается резонансными испытаниями строительных изделий, например железобетонных панелей.

Наиболее близким разработанному способу возбуждения колебаний является способ определения расположения трубопровода по патенту на изобретение № 2482515, 20.05.2013, заключающийся в том, что в трубопроводе осуществляют генерирование звуковых колебаний с резонансной частотой посредством динамического излучателя, устанавливаемого непосредственно в трубопровод на место запорно-регулирующей арматуры, и регистрацию сигнала динамического излучателя посредством чувствительного элемента.

Недостатком данного способа является невысокая точность и информативность возбуждения механических колебаний в упругой оболочке, так как возбуждение колебаний происходит за счёт динамического излучателя, который сначала возбуждает колебания в воздушной среде внутри упругой оболочки, а затем колебания передаются от воздушной среды к стенкам упругой оболочки. Кроме того, данный способ сложный в реализации, а именно необходимость снятия запорно-регулирующей арматуры для установки на её месте динамического излучателя.

Способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке обладает повышенной точностью и информативностью возбуждения механических колебаний и регистрации их.

Уникальность способа инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке заключается в том, что возбуждение колебаний в упругой оболочке осуществляют с помощью специально разработанного устройства - инерциального резонатора, состоящего из электропривода и закреплённого на его валу эксцентрика, при вращении которого возникают инерционные силы, реализующие через ось привода вибрационное воздействие на стенки упругой оболочки.

На рис. 1 представлена схема стенда, реализующего разработанный способ инерциального возбуждения механических низкочастотных колебаний. Описанный ранее способ реализуется следующим образом.

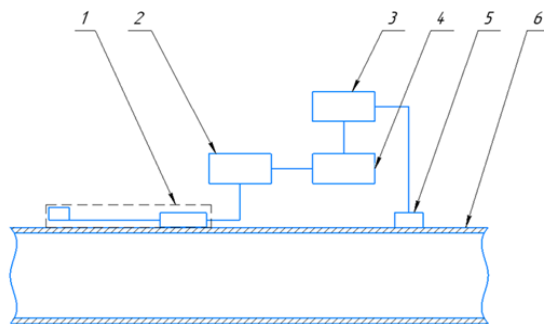


Рис. 1. Стенд для возбуждения диагностических вибрационных низкочастотных колебаний: 1 – инерционный резонатор; 2 – регулятор частоты вращения; 3 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 – персональный компьютер; 5 – чувствительный элемент; 6 – трубопровод

На стенку трубопровода 6 устанавливают инерционный резонатор 1 и чувствительный элемент 5. Из персонального компьютера 4 подаётся сигнал на регулятор частоты вращения 2, который приводит в действие инерционный резонатор 1, состоящий из электропривода и закреплённого на его валу эксцентрика, при вращении которого возникают инерционные силы, реализующие вибрационное воздействие на стенки трубопровода 6. Чувствительный элемент 5 измеряет параметры колебаний стенок трубопровода, сигнал от него направляется через аналого-цифровой преобразователь 3 в персональный компьютер 4 для регистрации возбуждаемых инерционным резонатором колебаний стенок трубопровода и дальнейшего анализа их параметров.

При этом обеспечивается возможность варьирования частоты вращения эксцентрика посредством электропривода с числовым программным управлением, состоящим из персонального компьютера, регулятора частоты вращения и инерционного резонатора.

Таким образом, анализируя параметры возбуждаемых инерционным резонатором колебаний стенок трубопровода, регистрируемых чувствительным элементом, можно выявлять и локализовать дефекты, т.е. определять техническое состояние трубопровода.

В качестве чувствительного элемента для съёма и регистрации колебаний стенок трубопровода могут использоваться датчики, которые условно делят на две группы:

- датчики, позволяющие проводить регистрацию колебаний бесконтактным способом, к ним можно отнести микрофоны и лазерные датчики;
- датчики, позволяющие проводить регистрацию колебаний контактным способом, к ним относятся пьезоэлектрические датчики.

В предлагаемой методике съём колебаний можно производить как контактным, так и бесконтактным способами. Для этого в среде программирования *LabVIEW* было разработано два программных обеспечения [20, 21].

Для регистрации колебаний контактным способом, с помощью пьезоэлектрического датчика, в среде *LabVIEW*, была разработана программа «*Condition monitoring system*» [22].

Для регистрации колебаний бесконтактным способом, помощью микрофона или лазерного датчика, была разработана программа «*Contactless monitoring system*» [23].

Кроме регистрации колебаний программы позволяют контролировать вибрационное воздействие, оказываемое инерционным резонатором на исследуемый трубопровод, также позволяет производить сбор, хранение и обработку [24] сигналов, поступающих с чувствительного элемента, в среде *LabVIEW*. В приведенных далее в этой статье результатах экспериментальных исследований в качестве чувствительного элемента использовался пьезоэлектрический датчик, а все сигналы обрабатывались в программе «*Condition monitoring system*» [25, 26].

На рис. 2 представлена панель программы «Генерация», в которой можно контролировать и регулировать частоту вращения инерционного резонатора.

На рис. 3 представлена панель программы «Регистрация», в которой происходит регистрация сигналов с микрофона и преобразование этих сигналов в спектр для дальнейшего анализа.

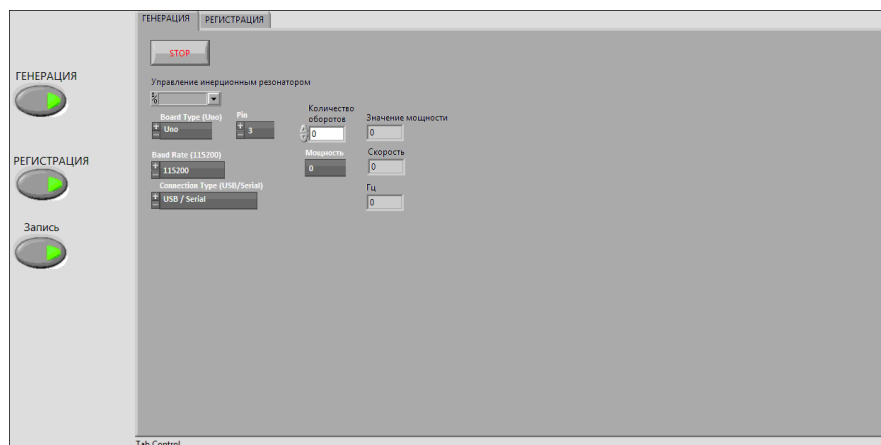


Рис. 2. Панель программы «Генерация».

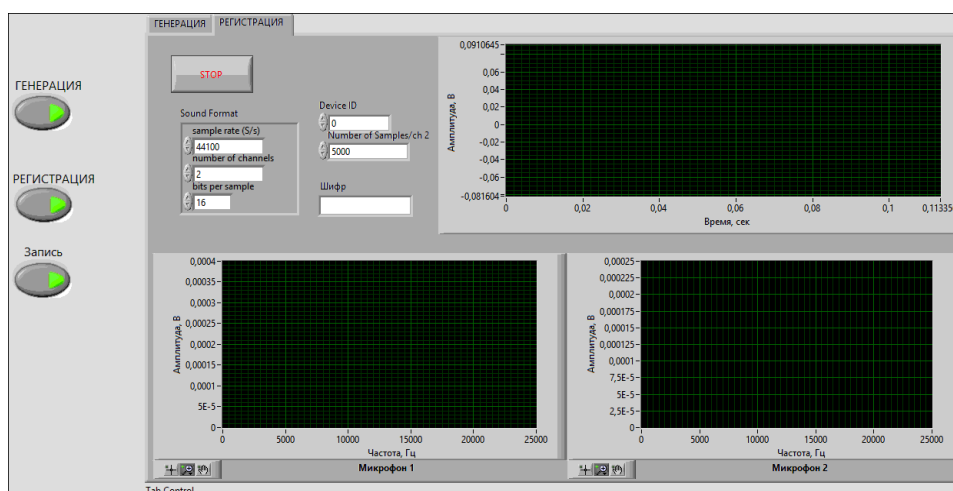


Рис.3. Панель программы «Регистрация».

Перед проведением экспериментальных исследований был проведен расчет исследуемой трубы для определения собственных частот мод её колебаний [27-29].

Для этой цели в системе автоматизированного проектирования (САПР) *Autodesk Inventor 2020* были построены 3D-модели труб, которые в дальнейшем рассчитывались в программном комплексе *ANSYS* [30]. *ANSYS* представляет собой программный пакет конечно-элементного анализа, решающий задачи из широкого спектра инженерной деятельности. *ANSYS* нашел применение как средство моделирования процессов и их прогнозирования в таких отраслях промышленности как двигателестроение, машиностроение, энергетика, автомобилестроение, судостроение, железнодорожный транспорт и т. д.

Расчет собственных частот включал в себя несколько этапов:

- импорт 3D модели исследуемого трубопровода из САПР *Autodesk Inventor 2020* в *ANSYS*;

- указание основных свойств материала трубы: плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона;

- создание сетки конечных элементов, при этом выбираются тип и качество сетки, используемое разбиение, количество узлов и элементов.

В данной работе использовалась сетка на твердом теле высокого качества, стандартная.

Расчет собственных колебаний проводился с помощью модального анализа [31]. Модальный анализ позволяет определить не только частоты собственных колебаний конструкции, но и их формы (моды). В результате расчет определены первые 50 мод колебаний трубопровода.

В представленной работе проведен расчет собственных частот трубы из стеклопластика с диаметром $d = 72$ мм, толщиной стенки $\delta = 4$ мм, длиной $L = 400$ мм

На рис. 4 представлена 3D-модель исследуемой трубы.



Рис. 4. 3D-модель трубопровода из стеклопластика размерами 400х72х6

Свойства материала:

- плотность $\rho=2000$ кг/м³;
- модуль упругости $E=56 \cdot 10^9$ Н/м²;
- коэффициент Пуассона $\nu=0,32$.

У исследуемого трубопровода имеются разные собственные частоты колебаний, найденные аналитически в программном комплексе ANSYS с помощью модального анализа. Результаты расчета собственных колебаний трубопровода представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты модального анализа стеклопластиковой трубы

Номер моды	Частота, Гц	Номер моды	Частота, Гц
1	262,69	26	1554,5
2	292,19	27	1626,
3	475,99	28	1682,
4	498,7	29	1693,9
5	527,59	30	1770,7
6	532,88	31	1779,6
7	623,76	32	1856,2
8	656,43	33	1915,2
9	710,81	34	1924,3
10	862,45	35	1965,6
11	864,03	36	2083,7
12	1049,3	37	2088,4
13	1065,	38	2096,3
14	1076,2	39	2129,5
15	1135,8	40	2280,9
16	1143,6	41	2303,7
17	1231,1	42	2354,2
18	1404,	43	2383,9
19	1410,3	44	2446,7
20	1447,1	45	2456,2
21	1453,8	46	2510,2
22	1468,5	47	2608,9
23	1483,4	48	2643,8
24	1511,9	49	2648,3
25	1549,2	50	2651,7

На рис.5 изображена одиннадцатая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 864,03 Гц

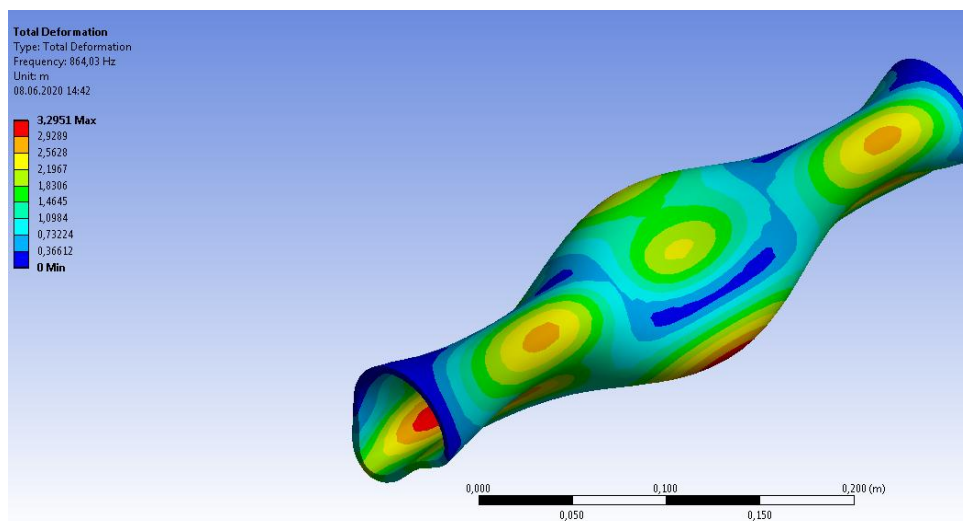


Рис. 5. Одиннадцатая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 864,03 Гц

На рис. 6 изображена двадцать пятая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 1549,2 Гц.

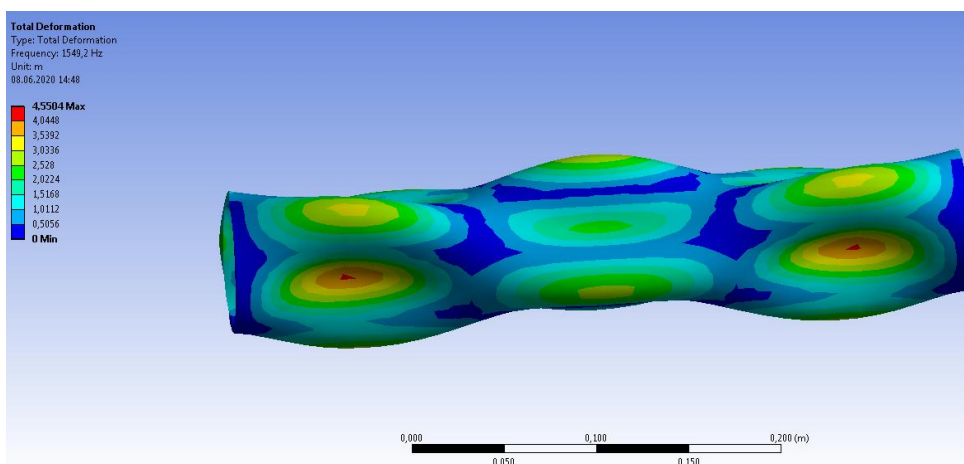


Рис. 6. Двадцать пятая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 1549,2 Гц

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана наиболее явная частота, равная 864 Гц, при которой наблюдалась максимальная амплитуда сигнала.

В ходе экспериментальных исследований для возбуждения колебаний использовался инерциальный резонатор. Для регистрации колебаний использовался пьезоэлектрический датчик, сигнал от которого поступал в персональный компьютер через аналого-цифровой преобразователь.

Были проведены многократные экспериментальные измерения с изменением точек возбуждения и точек съема колебаний, в разных точках трубопровода, при соблюдении правила: расстояние между инерциальным резонатором и пьезодатчиком было одинаковым и равнялось длине волны генерируемого сигнала.

На рис. 7 представлена фотография экспериментальной установки.

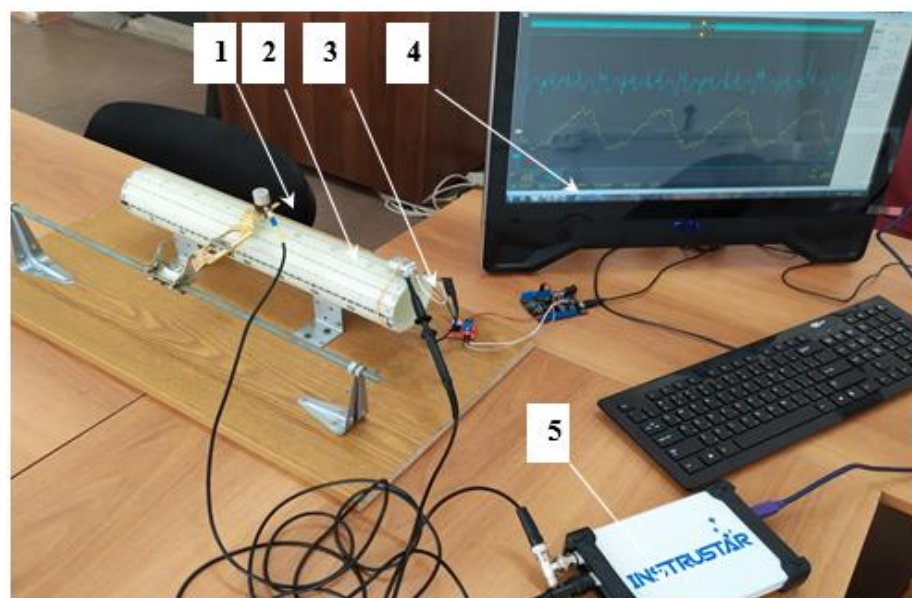


Рис. 7. Экспериментальная установка с трубой из стеклопластика:

1 – пьезоэлектрический датчик; 2 – исследуемый трубопровод; 3 – инерциальный резонатор; 4 – персональный компьютер; 5 – аналого-цифровой преобразователь

В процессе экспериментальных исследований генерировался опорный сигнал в 860 Гц, далее с помощью пьезоэлектрического датчика, расположенного на расстоянии, равном 1 длине волны, регистрировался выходной сигнал.

На рис. 8 изображен спектр опорного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы 400x72x4 мм. На спектре по оси ОХ показана частота сигнала в герцах (Гц), по оси ОУ амплитуда сигнала в вольтах (В).

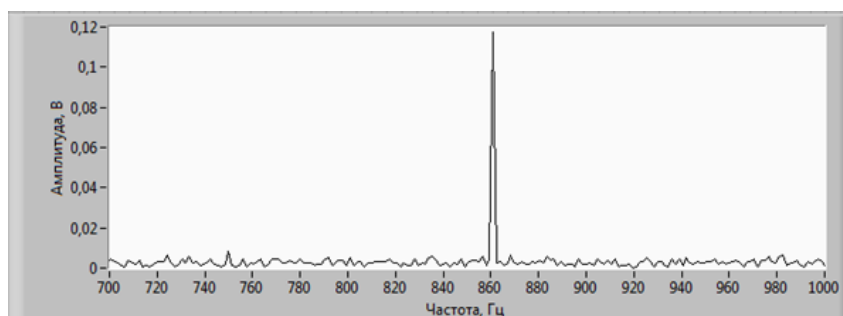


Рис. 8. Спектр опорного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы.

На рис. 9 изображен спектр выходного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы, регистрируемого пьезодатчиком.

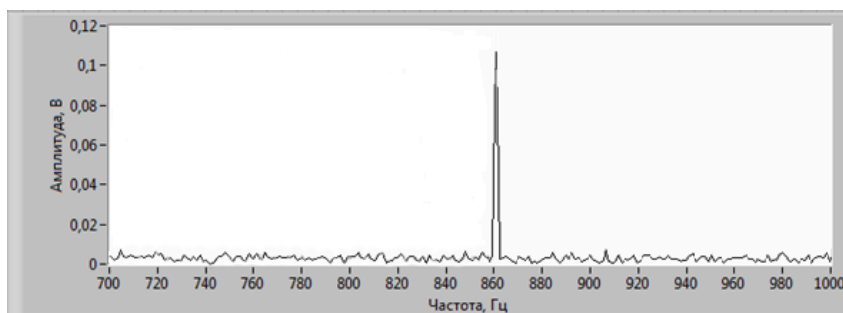


Рис. 9. Спектр выходного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы.

Результаты

Из полученных в результате экспериментальных исследований спектров видно, что частоты опорного и выходного сигналов одинаковы, но при этом происходит диссипация колебательной энергии за счёт прохождения через стенку бездефектного трубопровода.

Известно, что любое нарушение структуры материала (не сплошность, трещина и пр.), характеризующееся как дефект, приводит к увеличению степени рассеивания колебательной энергии, соответственно выходной сигнал, регистрируемый пьезодатчиком, будет заметно слабее опорного, генерируемого инерциальным резонатором. По степени ослабления сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах.

Обсуждение

В статье предложена методика оценки технического состояния трубопроводов, представлено устройство инерциального возбуждения колебаний в исследуемом объекте. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на трубопроводе из стеклопластика размерами 400*72*4 мм. Результаты показали, что амплитуда сигнала на бездефектном трубопроводе меняется незначительно. Происходит процесс нормального рассеивания колебательной энергии за счет её прохождения через твердое тело, однако, учитывая, что любой дефект является изменением структуры материала, соответственно коэффициент рассеивания колебательной энергии в месте дефекта будет больше, что приведет к ослаблению сигнала, регистрируемого пьезодатчиком. Предлагаемая методика является основой создания нового измерительно-диагностического комплекса для вибрационного контроля трубопроводов.

Заключение или Выводы

Результаты исследований, приведенные в статье, показали, что по степени ослабления амплитуды сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах. Предлагаемая методика является основой создания нового измерительно-диагностического комплекса для вибрационного контроля трубопроводов.

Литература

1. Гапоненко С.О. Акустико-резонансный информационно-измерительный комплекс и методика контроля местоположения заглубленных трубопроводов: автореферат дис. кандидата технических наук / Казан. гос. энергет. ун-т. Казань, 2017. 22 с.
2. Gaponenko S.O., Nazarychev S.A., Kondratiev A.E. Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control // Helix. 2018. V. 8(1). P. 2481-2487.
3. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Измерительно-диагностический комплекс для определения расположения скрытых трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ. 2013. №3-4. С. 138-141.
4. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Модельная установка для разработки способа определения местоположения скрытых трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ. 2014. №7-8. С. 123-129.
5. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Перспективные методы и методики поиска скрытых каналов, полостей и трубопроводов виброакустическим методом // Вестник Северо-Кавказского федерального университета». Ставрополь: СКФУ. 2015. №2(47). С. 9-13.
6. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика поиска скрытых полых объектов в грунте // Научному прогрессу – творчество молодых. Поволжский государственный технологический университет. 2017. №2-4. С. 115-118.
7. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О. Разработка надёжного и энергоэффективного способа диагностики технического состояния энергетического оборудования. // Материалы 14 Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019.
8. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О. Повышение надёжности работы энергетических систем путем определения технического состояния трубопроводов // Материалы XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019.
9. Гапоненко С.О., Шакурова Р.З. Повышение эффективности энергетических систем и систем транспортировки энергоносителя с использованием методов математического моделирования // Материалы 24 международной молодежной научной конференции «ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых)». Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019.
10. Зацепин А.Ф. Акустический контроль; под редакцией члена-корреспондента РАН, профессора, доктора технических наук В. Е. Щербинина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, [Физико-технологический институт]. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2016. 209 с.
11. Канцдалов В.Г., Королев В.С., Балтян В.Н. и др. Диагностика типовых повреждений

трубопроводов и физико-механических свойств котло-турбинных сталей энергооборудования ТЭС и АЭС :учебное пособие. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. 90 с.

12. Gladwell G.M.L. Inverse Problems in Vibration. 2nd ed. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Русский перевод: Гладвелл Г.М.Л. Обратные задачи теории колебаний. М.Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008).

13. Zachwieja J // Effectiveness of diagnosing damage to an industrial pump rotor by analysing its vibrations // Diagnostyka. 2019. V. 20. Iss. 1. P. 33-39.

14. Zachwieja J. Pipeline stress analysis under supporting structure vibration // Diagnostyka. 2017. Vol. 18. Iss. 2. P. 23-30.

15. Stein Y., Zonova, N., Kubrak, I. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 90. Iss. 1.

16. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Шакурова Р.З. Способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке // Патент России № 2705515 от 07.11.2019.

17. Потапов Д.А., Телышев ДВ. Основы проектирования виртуальных приборов в программной среде LabVIEW :компьютерный лабораторный практикум. Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «МИЭТ». Москва : МИЭТ, 2017. 48 с.

18. Федосов В.П. Цифровая обработка звуковых и вибросигналов в LabVIEW [Текст] : функций системы NI Sound and Vibration LabVIEW / Москва:ДМК Пресс, 2009. 1289 с.:ил., табл.

19. Гапоненко С.О., Шакурова Р.З., Кондратьев А.Е., Condition monitoring system // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618374 от 01.07.2019.

20. Гапоненко С.О., Шакурова Р.З., Кондратьев А.Е., и др. Contactless monitoring system // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617616 от 18.06.2019.

21. Капранов Б.И., Короткова И.А. Спектральный анализ в неразрушающем контроле. Томск: Томский политехнический университет, 2008.

22. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series // Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects 2019.

23. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series // Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method. 2019.

24. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Dimova R. E3S Web of Conferences, SES 2019 // Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes. 2019.

25. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Dimova R. E3S Web of Conferences, SES 2019 // Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage. 2019

26. Nazarychev S.A., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z. Development of Software and Hardware Complex based on Theoretical Modeling and Experimental Study of Linearly Extended Energy Facilities on their Technical Condition // Helix. 2019. V. 9 (5):5621- 5630.

27. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Нижний Новгород: 2006.

Авторы публикации

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гапоненко Сергей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Gaponenko SO. Acoustic-resonance information-measuring complex and methodology for monitoring the location of buried pipelines: abstract of dis. candidate of technical sciences. Kazan state power engineering university. Kazan. 2017. P. 22
2. Gaponenko SO, Nazarychev SA, Gaponenko SO, et al. Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control. *Helix*. 2018;8(1):2481-2487.
3. Gaponenko SO, Kondratiev AE, et. al. Measuring and diagnostic complex for determining the location of hidden pipelines. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;4:138-141.
4. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Model installation for the development of a method for determining the location of hidden pipelines. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2014;7(8):123-129.
5. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Promising methods and techniques for searching for hidden channels, cavities and pipelines by vibroacoustic method. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2015;2(47):9-13.
6. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Methodology for the search for hidden hollow objects in the ground. *Scientific progress - creativity of the young*. 2017; 2(4):115-118.
7. Shakurova RZ, Gaponenko SO. Development of a reliable and energy efficient method for diagnosing the technical condition of power equipment. *Materials of the XIV International Youth Scientific Conference on Natural Science and Technical Disciplines "Scientific Progress - Creativity of Young"*. 2019;2:195-197.
8. Shakurova RZ, Gaponenko SO. Improving the reliability of energy systems by determining the technical condition of pipelines. *Materials of the XIV International Youth Scientific Conference "Tinchurin Readings"*. 2019; 184-187.
9. Gaponenko SO, Shakurova RZ. Improving the efficiency of energy systems and energy transportation systems using mathematical modeling methods. *Materials of the XXIV International Youth Scientific Conference "TUPOLEV READINGS (school of young scientists)"*. 2019; 641-644.
10. Talanin AA, Mazanov AM, Zakalyukina LA, et.al. Review of quality control methods for welded joints. *NiKa*. 2017.
11. Stepanov AP, Stepanov MA. Method for magnetic flaw detection of extended ferromagnetic structures. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012;1(33).
12. Korotin AI, Lazarev AL, Svyatkina GN. Application of ultrasonic control methods to assess the quality of joints in metal structures in modern conditions. *Ogarev-Online*. 2015;13(54).
13. Chistyakova AV, Orlov VA, Chuvin VA. Diagnostics of the technical condition of metal pipelines. *Environmental management*. 2016;2.
14. Belov AA, Ivanov YuD, et al. Recommendations for choosing a method for monitoring the technical condition of pipelines. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2015;1-10.
15. Zachwieja J. Effectiveness of diagnosing damage to an industrial pump rotor by analysing its vibrations. *Diagnostics*. 2019;20(1):33-39.
16. Zachwieja J. Pipeline stress analysis under supporting structure vibrations. *Diagnostics*. 2017;18(2):23-30.
17. Stein Y, Zonova N, et al. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90(1),012139.
18. Gaponenko SO, Kondratiev AE, Shakurova RZ. Method of inertial excitation of mechanical vibrations in an elastic shell. Patent of Russia No. 2705515 dated 07.11.2019.
19. Hudonogova LI. Development of a system for remote calibration of measuring instruments based on the use of technological capabilities of the Lab VIEW software environment. *Well-being vectors: economy and society*. 2013;4(10).
20. Tychkov AYU, Churakov PP. Development of virtual measuring generators for functional diagnostics. *Measurement. Monitoring. Control. The control*. 2015;2(12).
21. Gaponenko SO, Shakurova RZ, Kondrat'ev AE, et al. Condition monitoring system. Certificate of state registration of a computer program №2019618374 dated 01.07.2019.
22. Gaponenko SO, Shakurova RZ, Kondrat'ev AE, et al. Contactless monitoring system. Certificate of state registration of a computer program. №2019617616. dated 06/18/2019.
23. Mrachkovskij OD, Vishnevyy SV. Modeling a spectral signal analyzer in the LabVIEW software environment. *Bulletin of NTUU "KPI". Radio engineering, Radio apparatus engineering*. 2008;37.
24. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019; 1328,012054.
25. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method. *IOP Conf.*

Series: *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019; 1328,012055.

26. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes. *E3S Web of Conferences*. 2019; 124,01021.

27. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage. *E3S Web of Conferences*. 2019;124,05029.

28. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Development of software and hardware complex based on theoretical modeling and experimental study of linearly extended energy facilities on their technical condition. *Helix*. 2019;9(5):5621-5630.

29. Verhman SI, Kulagin VN, et al. Multipurpose Analysis Software. ANSYS. ONV.1998;5.

30. Grinev MA, Anoshkin AN, et al. Computational and experimental studies of natural frequencies and vibration modes of a straightening apparatus blade made of polymer composite materials. *PNRPU Bulletin. Mechanics*. 2016.

Authors of the publication

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Sergey O. Gaponenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexander E. Kondratiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

18 ноября 2020г.

Отредактировано

09 декабря 2020г.

Принято

09 декабря 2020г.



ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКСТРАГЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Ву Нгок Зан, В.Ф. Новиков

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
vndan@cnd.edu.vn

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Для контроля технического состояния маслonaполненного электрооборудования в последнее время создан ряд новых аналитических методик, позволяющих определять ультрамалые концентрации примесных соединений в трансформаторном масле. Анализ литературных данных показал, что на этой стадии аналитической процедуры могут возникать существенные погрешности, которые ухудшают качество контроля технического состояния маслonaполненного электрооборудования, а в некоторых случаях сделают его результаты бессмысленными. В опубликованных литературных источниках практически не обсуждается проблема пробоподготовки трансформаторного масла, что негативно сказывается на качестве аналитического контроля, то есть на надежности получаемых результатов и соответственно на диагностике маслonaполненного электрооборудования. В работе обсуждается система пробоподготовки трансформаторного масла, в основу которой положены различные методы выделения из него целевых компонентов. Используется процесс адсорбции, получение химических производных, различные виды экстракции, жидкостную, газовую, твердофазную и флюидную, а также с использованием низких температур, экстракции в микроволновых, магнитных, электромагнитных и центробежных полях. **МЕТОДЫ.** Показано, что из всех методов пробоподготовки широко применяется жидкостная экстракция органическим растворителем, с помощью которой из трансформаторного масла извлекаются фурановые соединения, образующиеся в результате деструкции бумажной изоляции. Обсуждаются недостатки пробоподготовки с помощью жидкофазной экстракции и возможности использования для этой цели твердофазной экстракции на различных адсорбентах. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены результаты экспериментальных исследований сорбционных свойств различных органических растворителей по отношению к пористым материалам, отличающихся структурой их поверхности. Использовали цеолитсодержащие породы Татарско-шатиранского месторождения, синтетические цеолиты NaX-13^A. Методом восходящего варианта жидкостной колоночной хроматографии определены абсолютные величины удерживания стандартных экстрагентов и найдены их зависимости от длины сорбционного слоя пористого материала. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что наиболее высокие величины времени удерживания на всех исследуемых адсорбентах наблюдаются для хлорорганических экстрагентов, хлороформа, четыреххлористого углерода, дихлорэтана, трихлорэтилена. Для н. Гексан это взаимодействие относительно небольшие. Приведены гистограммы влияние времени удерживания стандартных сорбатов (экстрагентов) от их физико-химические природы.

Ключевые слова: электрооборудование, трансформаторное масло, контроль, сорбент, деструкция, экстракция, хроматография, удерживания, растворитель.

Для цитирования: Ву Нгок Зан, Новиков В.Ф. Хроматографические методы исследования органических экстрагентов трансформаторного масла // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 202-210. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-202-210.

CHROMATOGRAPHIC METHODS FOR THE STUDY OF ORGANIC EXTRACTANTS OF TRANSFORMER OIL

Vu Ngoc Dan, BF. Novikov
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vndan@cnd.edu.vn

Abstract: *THE PURPOSE.* In order to control the technical condition of oil-filled electrical equipment, a number of new analytical methods have recently been created to determine the ultra-low concentrations of impurity compounds in transformer oil. An analysis of the literature data showed that at this stage of the analytical procedure significant errors may occur that worsen the quality of control of the technical condition of oil-filled electrical equipment, and in some cases make its results meaningless. The published literature practically does not discuss the problem of sample preparation of transformer oil, which negatively affects the quality of analytical control, that is, the reliability of the results and, accordingly, the diagnosis of oil-filled electrical equipment. *METHODS.* The paper discusses a sample preparation system for transformer oil, which is based on various methods for extracting target components from it. The adsorption process is used, the preparation of chemical derivatives, various types of extraction, liquid, gas, solid phase and fluid, as well as using low temperatures, extraction in microwave, magnetic, electromagnetic and centrifugal fields. It is shown that liquid extraction with an organic solvent is widely used from all sample preparation methods, with the help of which furan compounds resulting from the destruction of paper insulation are extracted from transformer oil. The disadvantages of sample preparation using liquid-phase extraction and the possibility of using solid-phase extraction on various adsorbents for this purpose are discussed. *RESULTS.* The results of an experimental study of the sorption properties of various organic solvents with respect to porous materials differing in the structure of their surface are presented. We used zeolite-bearing rocks of the Tatar-Shatrashansky deposit, synthetic zeolites NaX-13^A. Using the ascending variant of liquid column chromatography, the absolute retention values of standard extractants were determined and their dependence on the length of the sorption layer of the porous material was found. *CONCLUSIONS.* It was shown that the highest retention times for all studied adsorbents are observed for organochlorine extractants, chloroform, carbon tetrachloride, dichloroethane, trichlorethylene. For N. Hexane is a relatively small interaction. Histograms are given of the effect of the retention time of standard sorbates (extractants) on their physicochemical nature.

Key words: *electrical equipment, transformer oil, control, sorbent, destruction, extraction, chromatography, retention, solvent.*

For citation: Vu Ngoc Dan, Novikov BF. Chromatographic methods for the study of organic extractants of transformer oil. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):202-210. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-202-210.

Введение

Для контроля технического состояния маслonaполненного электрооборудования в последнее время создан ряд новых аналитических методик, позволяющих определять ультрамалые концентрации примесных соединений в трансформаторном масле. При этом пробоподготовке трансформаторного масла не уделяется достаточного внимания. Анализ литературных данных показал, что на этой стадии аналитической процедуры могут возникать существенные погрешности, которые ухудшают качество контроля технического состояния маслonaполненного электрооборудования, а в некоторых случаях сделают его результаты бессмысленными. В опубликованных литературных источниках практически не обсуждается проблема пробоподготовки трансформаторного масла, что негативно сказывается на качестве аналитического контроля, то есть на надежности получаемых результатов и соответственно на диагностике маслonaполненного электрооборудования.

Как известно пробоподготовка трансформаторного масла включает все операции, которым подвергается проба, начиная с ее отбора, транспортировки в испытательную лабораторию и заканчивая ее вводом в аналитическую систему [1-3].

Подготовка пробы заключается в следующих операциях: отбор пробы трансформаторного масла из бака силового трансформатора, транспортировка пробы в испытательную лабораторию; консервация пробы и их хранение; подготовка пробы к последующему анализу; инструментальный метод анализа пробы; на основе результатов анализа диагностика технического состояния маслonaполненного электрооборудования.

Система пробоподготовки трансформаторного масла основана на выделении из него целевых компонентов, которые в дальнейшем возможно проанализировать различными инструментальными методами. С этой целью используют процесс адсорбции, получение химических производных и экстракцию, которая подразделяется на жидкостную, газовую, твёрдофазную, сверхкритическую флюидную, а также с использованием низких температур [4-6]. Кроме того перспективным направлением является экстракция в микроволновых, магнитных, электромагнитных и центробежных полях, которая позволяет разделить

компоненты трансформаторного масла на группы веществ. В этом случае процесс пробоподготовки трансформаторного масла можно легко автоматизировать, что приведёт к уменьшению погрешности определения анализируемых компонентов за счёт исключения влияние человеческого фактора [7-9].

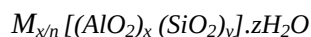
Материалы и методы

Из всех методов пробоподготовки трансформаторного масла наиболее широко применяется жидкостная экстракция, с использованием которой из трансформаторного масла извлекают фурановые соединения, которые образуются в силовых трансформаторах в результате деструкции бумажной изоляции. Эти соединения извлекают селективными растворителями с последующим их анализом с помощью высокоэффективной жидкостно-жидкостной, газовой и тонкослойной хроматографии [10-12].

Метод жидкостной экстракции имеет ряд существенных недостатков, заключающихся в неполном извлечении фурановых соединений из трансформаторного масла, использование относительно большого объёма токсичных растворителей, плохой воспроизводимости процесса жидкостной экстракции и др.

Более перспективным направлением в системе пробоподготовки трансформаторного масла является применение твердофазной экстракции, когда компоненты разделяются за счёт различия в энергии сорбции на пористых материалах с широко развитой системой макро и микро пор, а затем вымываются из адсорбента селективными растворителями и могут быть проанализированы различными инструментальными методами [13-15].

Для проверки этого положения нами было проведено исследование сорбционных свойств органических растворителей, используемых в различных вариантах хроматографии по отношению к различным пористым материалам. Экспериментальная часть работы проводили методом восходящей жидкостной колоночной хроматографии, на колонках длиной 120 мм и внутренним диаметром 4 мм. Органический растворитель заливался в вials и он поднимался по сорбционному слою пористого материала за счёт капиллярных сил. Через каждые 10 мм подъёма растворителя фиксировали его время, а сорбционную ёмкость определяли гравиметрическим методом по разности масс сорбируемого растворителя на длине слоя в 100 мм. В качестве пористого материала использовали цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения, которые являются водными каркасными алюмосиликатами щелочных и щелочноземельных металлов с обобщенной эмпирической формулой [16].



где: M – катион с валентностью n , z – число молекул воды.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведен элюотропный ряд используемых хроматографических растворителей и их физико-химические свойства.

Таблица 1

Элюотропный ряд хроматографических растворителей – Диэлектрическая проницаемость; $T_{\text{кип.}}^0$ – Температура кипения; d_u^{20} – Плотность; n_d^{20} – Показатель преломления; cP^{20} – Вязкость; μ^{20} – Дипольный момент).

№	Растворитель	ϵ_{20}^0	$T_{\text{кип.}}^0$ °C	d_u^{20}	n_d^{20}	cP^{20}	μ^{20}
1	Н.-Гексан	0,00	69,0	0,660	1,416	0,32	0,05
2	Толуол	0,29	111,0	0,866	1,497	0,58	0,06
3	Бензон	0,32	80,0	0,879	1,501	0,65	0,00
4	Хлороформ	0,40	62,0	1,480	1,144	0,57	1,15
5	Дихлоэтан	0,44	83,0	1,253	1,445	0,79	1,75
6	Ацетон	0,56	56,0	0,791	1,359	0,32	2,70
7	Этилацетат	0,58	77,0	0,900	1,373	0,45	2,48
8	Этанол	0,88	78,0	0,789	1,361	1,20	1,68

Как видно из табл. 1 из всего ряда хроматографических растворителей наиболее высокая диэлектрическая проницаемость характерна для этанола. Однако область его применения в качестве экстрагента ограничивается его высокой гигроскопичностью и наличие относительно большого количества воды. Этанол и этилацетат имеют близкие значения температуры кипения, однако сильно отличаются по плотности и вязкости. Кроме того этилацетатом по сравнению с этанолом имеет более высокое значение дипольного момента $\mu^{20}=2,48$.

Предварительно было проведено исследование отработанного трансформаторного масла марки Гк-1 с помощью радиальной тонкослойной хроматографии на пластинках

«Sorbfil». В качестве элюента использовался уайт-спирит, который состоит из смеси углеводородов различной структуры. Трансформаторное масло объемом 1 мкл с помощью микрошприца наносили в центр тонкослойной пластинки, на которую затем с постоянной скоростью подавали уайт-спирит. Как видно из рис.1. трансформаторное масло марки Гк-1 имеет сложный углеводородный состав, который состоит из шести групп компонентов. Это смолы, асфальтены, нафтеновые, парафиновые, ароматические углеводороды, а также продукты деструкции трансформаторного масла в виде шлама, который обладает низкой подвижностью и остается в центральной области тонкослойной пластинки.

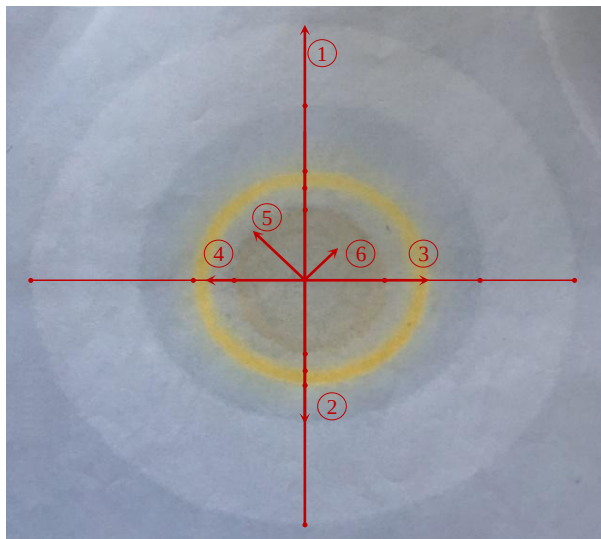


Рис.1. Радиальная хроматограмма отработанного трансформаторного масла марки ГК-1 на тонкослойных пластинках «Sorbfil». Растворитель: Уайт-спирит. Порядок элюирования групп компонентов: 1 - Парафиновые углеводороды, 2 - Нафтеновые углеводороды, 3 - Ароматические углеводороды, 4 - Асфальтены, 5 - Смолы, 6 - Шлам.

В табл. 2 приведено абсолютное время удерживания растворителей на синтетических и природных цеолитах.

Таблица 2

Абсолютное время удерживания органических растворителей по длине сорбционного слоя в 100 мм природных и синтетических цеолитов.

№/пп	Растворитель	$T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	Дипольный момент, μ_D	Время удерживание, $t_{\text{уд}}$ (мин)	
				Цеолит природный	Цеолит синтетический NaX-13A
1	Хлороформ	61,2	1,15	58,4	78,5
2	н.-Гексан	68,0	0,05	29,4	44,5
3	Тетрахлорметан	76,7	0	56,6	106,1
4	Этилацетат	77,1	2,48	89,2	26,3
5	Метилэтилкетон	79,6	2,84	50,4	143,0
6	Дихлорэтан	83,6	1,75	88,5	69,5
7	Трихлорэтилен	87,2	0,85	33,8	53,5
8	о.-Ксилол	144,4	0,62	69,0	57,1

Как видно из таблицы время удерживания органических растворителей на синтетических цеолитах отличается от природы что связывается с их структурными особенностями.

На рис 2 представлен график зависимости абсолютного времени удерживания органических растворителей от длины сорбционного слоя цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения (природные цеолиты). Из рис. видно, что время удерживание органических растворителей исследуемым сорбентом определяется их природой. Так, наиболее низкие величины удерживания характерны для н.-гексана, который является неполярным растворителем с дипольным моментом, близким к нулю. В тоже время непонятный тетрачлорметан, имеющий более высокую температуру кипения, элюируется из хроматографической колонки позже н.-гексана. Как для цеолитсодержащей

породы Татарско-Шатрашановского месторождения, так и в случае синтетических цеолитов NaX-13A. При этом синтетический цеолит NaX-13A характеризуется более высоким значениям времени удерживания по сравнению с цеолитсодержащей породой Татарско-Шатрашановского месторождения как для н.-гексана, так и тетрахлорметана. Высокие значения времени сорбции неполярных соединений на синтетическом цеолите, повидимому определяется более регулярным распределением пор по размерам за счёт сотового эффекта.

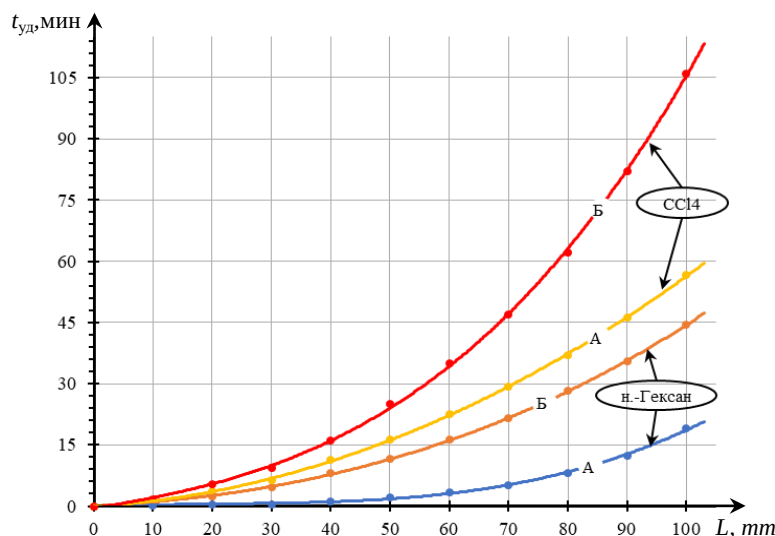
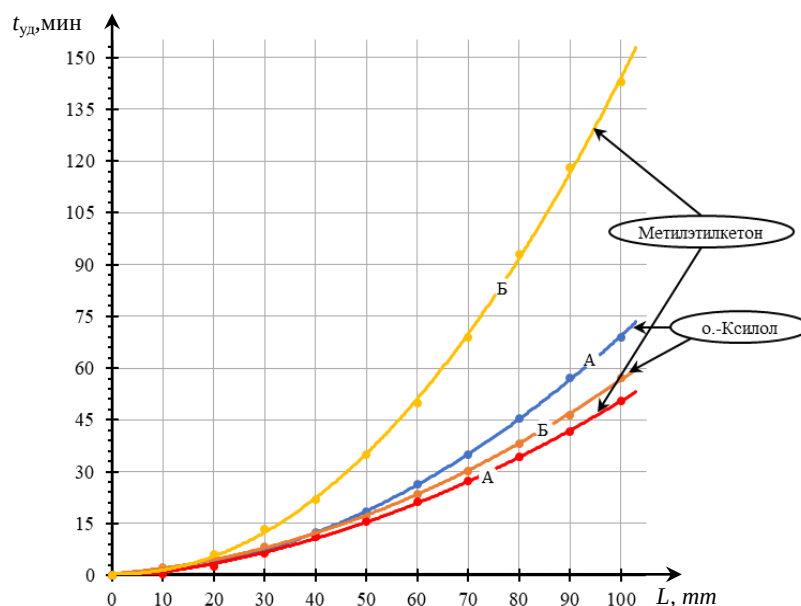


Рис. 2. Зависимость абсолютного времени удерживания н.-гексана и тетрахлорметана от длины сорбционного слоя различных адсорбентов: А - Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения; Б - Цеолит синтетический NaX-13A.

На рис. 3 приведена зависимость абсолютного времени удерживания метилэтилкетона с дипольным моментом $\mu_D=2,84$ и о.-ксилола с дипольным моментом $\mu_D=0,62$. При этом о.-ксилол имеет близкие величины абсолютного времени удержания как для природных так и синтетических цеолитов. Это, очевидно связано со структурными особенностями о.-ксилола, молекулы которого не может проникнуть в поры как синтетического так и природного цеолита в результате стерических затруднений. В данном случае наблюдается орто эффект заместителя. Напротив абсолютное время удерживания метилэтилкетона имеет экстремально высокие значения для синтетического цеолита по



сравнению с природным материалом.

Рис. 3. Зависимость абсолютного времени удерживания о.-ксилола и метилэтилкетона от длины сорбционного слоя различных адсорбентов: А - Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения; Б - Цеолит синтетический NaX-13A

На рис. 4 приведена гистограмма, показывающая влияние абсолютного времени удержания органических растворителей от их физико-химической природы на различных адсорбентах. Как видно из рис. для синтетических цеолитов экстремально высокие значения времени удерживания являются характерными для н.-гексана, трихлорэтилена, хлороформа и метилэтилкетона. Для цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения экстремально высокие значения абсолютных время удерживания наблюдаются для о.-кислота, дихлорэтана и этилацетата. Такие различия в сорбируемости органических растворителей природными и синтетическими цеолитами очевидно определяются их структурными особенностями кристаллической решетки и степень доступности к взаимодействию с сорбционными центрами.

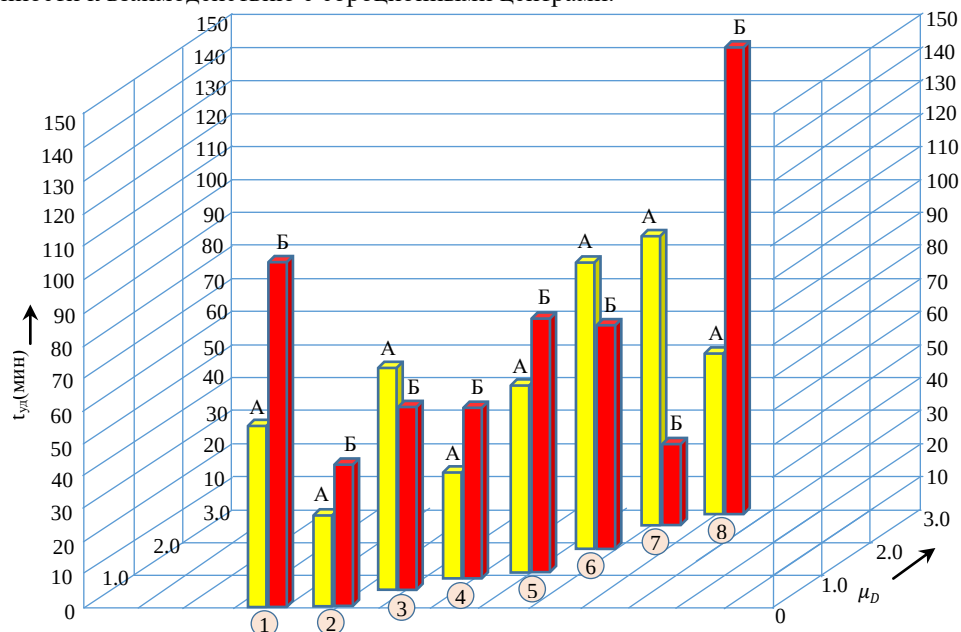


Рис. 4. Гистограмма влияние времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и дипольного момента. Растворители: 1: Углерод 4-х хлористый; 2: н-Гексан; 3: о-Кислот; 4: Трихлорэтилен; 5: Хлороформ; 6: Дихлорэтан; 7: Этилацетат; 8: Метилэтилкетон. Сорбенты: А: Цеолит природный Татарско-Шатрашановского месторождения; Б: Цеолит синтетический NaX-13A.

Как видно из рис.4 наиболее высокие значения величины удерживаемого объёма сорбатов наблюдаются для углерода четыреххлористого, который имеет нулевой дипольный момент.

В условиях эксплуатации трансформаторного электрооборудования фурфурол превращается в фурфуриловый спирт, который можно использовать в качестве тестового вещества. Для определения фурфурилового спирта в трансформаторном масле, использовали сорбцию трансформаторного масла пористыми материалами.

На рис. 5 приведена хроматограмма разделения трансформаторного масла на индивидуальные компоненты, из которой видно, что их количество составляет больше 250 соединений, кипящих в широком температурном интервале. Из рис. также видно, что как при сорбции так и экстракции органическими растворителями происходит удаление высококипящих компонентов трансформаторного масла, что ускоряет процесс анализа фурфурилового спирта в трансформаторном масле.

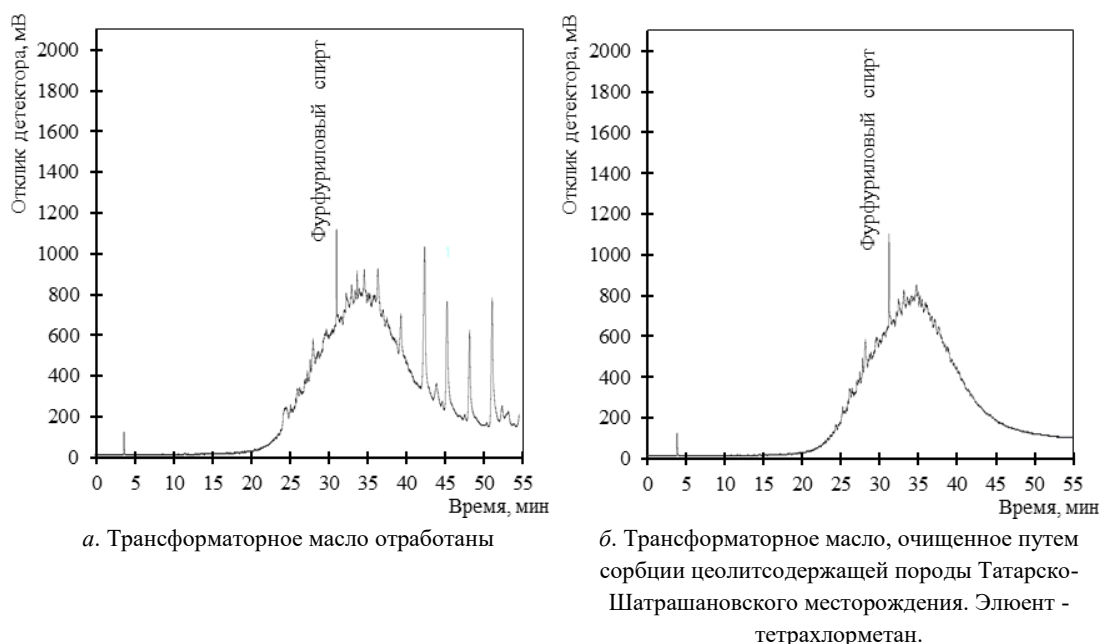


Рис. 5. Хроматограмма разделения индивидуальных компонентов трансформаторного масла и фурфурилового спирта

Условие анализа: Газо-жидкостный хроматограф «Хромос ГХ - 1000» с пламенно-ионизационным детектором. Колонка капиллярная кварцевая длиной 30м., внутренним диаметром 0,32мм, заполненная неподвижной фазой Vako BoHa VB WAX P/n CF 5903032050A. Скорость газа носителя 0,05мл/мин. Линейное программирование температуры колонки от 40оС до 250оС со скоростью подъема температура пять градусов в минуту.

Как видно из приведенной хроматограммы фурфуриловый спирт, образующийся в результате деструкции бумажной изоляции и лизирующий в трансформаторное масло можно определять непосредственно с использованием капиллярной хроматографической колонки с полярной неподвижной фазой. При этом время его удерживание составляет 30 мин. Ограничением прямого ввода пробы трансформаторного масла в инжектор газо-жидкостного хроматографа является возможность засорения хроматографической колонки тяжелыми компонентами трансформаторного масла. Поэтому после проведения каждого анализа хроматографическую колонку необходимо кондиционирование при повышенной температуре.

Заключение

На основе проведенных исследований показано, что отработанное трансформаторное масло можно анализировать с использованием радиальной тонкослойной хроматографии, с помощью которой возможно определение группового состава. Фурфуриловый спирт, образующийся в результате деструкции бумажной изоляции можно контролировать путем непосредственного анализа на капиллярной колонке с полярной неподвижной жидкой фазой.

Литература

1. Сычев К.С., Даванков В.А.. Материалы и методы пробоподготовки в хроматографии: твердофазное концентрирование и адсорбционная очистка. Обзор. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2004. Т.4. №1. С. 5-28.
2. Карпов Ю.А., Савостин. Методы пробоотбора и пробоподготовки. М. : БИНОМ, 2015. 246 с.
3. Шелпакова И.Р. Косяков В.И. О системном подходе к разработке методик концентрирования примесей отгонкой основы пробы в анализе веществ высокой чистоты // Аналитика и контроль. 1998. №3-4. С. 26-40.
4. Dias A.L.B., Cunha G.N., Santos P., et al. Fusel oil: Water adsorption and enzymatic synthesis of acetate esters in supercritical CO₂// The Journal of Supercritical Fluids. 2018. V. 142. P. 22-31.
5. Dias A.L.B., Santos dos P., Martínez J. Supercritical CO₂ technology applied to the production of flavor ester compounds through lipase-catalyzed reaction: a review // Journal of CO₂ Utilization. 2018. V. 23. P. 159-178.

6. Santosdos P., Meireles M.A.A., Martínez J. Production of isoamyl acetate by enzymatic reactions in batch and packed bed reactors with supercritical CO₂ // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017. V. 127. P. 71-80.
7. Montoya N., Duran J., Cordoba F., et al. Colombian fusel oil El aceite de fusel de Colombia // *Ingenieriae Investigacion*. 2016. Vol. 36. P. 21-27.
8. Santos P., Rezende C.A. Martinez J. Activity of immobilized lipase from *Candida antarctica* (Lipozyme 435) and its performance on the esterification of oleic acid in supercritical carbon dioxide // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2016. V. 107. P. 170-178.
9. Santos P., Zabot G.L., Meireles M.A.A., et al. Synthesis of Eugenyl Acetate by Enzymatic Reactions in Supercritical Carbon Dioxide // *Biochemical Engineering Journal*. 2016. V. 114. P. 1-9.
10. Zuway K.Y., Smith J.P., Foster C.W., et al. Detection and quantification of new psychoactive substances (NPSs) within the evolved "legal high" product, NRG-2, using high performance liquid chromatography-amperometric detection (HPLC-AD) // *Analyst*. 2015. V. 140. P. 6283-6294.
11. Rivoira L., De Carlo R.M., Cavalli S., et al. Simple SPE-HPLC determination of some common drugs and herbicides of environmental concern by pulsed amperometry // *Talanta*. 2015. V. 131. P. 205-212.
12. Butler O., Forder J., Saunders J. Analytical protocol for the sensitive determination of mannitol, sorbitol and glucose containing powders in pharmaceutical workplaces by ion chromatography using a pulsed amperometric detector // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2015. V. 106. P. 204-209.
13. Чижков В.П., Бойцов В. Н. Обобщенная теория хроматографии и многоступенчатой жидкостной экстракции // *Журнал физической химии*. 2017. Т 91. № 3. С. 549-557.
14. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 1-2, С. 47-52.
15. Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. В трех частях. Ч.III. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: Монография. Под редакцией профессора В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун - т. 2018. 328 с.
16. Буров А.И., Тюрин А.Н., Якимов А.В. и др. Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Казань: издательство «ФЭН» АН РТ. 2001. 176 с.

Авторы публикации

Ву Нзюк Зан – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, профессор, кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Sychev KS, Davankov VA. Materialy i metody probopodgotovki v khromatografii: tverdogfaznoe kontsentririrovanie i adsorbtsionnaya ochistka. Obzor. *Sorbtsionnye I khromatograficheskie protsessy*. 2004;4(1):С. 5-28.
2. Karpov YuA, Savostin. Metody probopodgotovki i probopodgotovki. M.: BINOM, 2015;24.
3. Shelpakova IR, Kosyakov VI. O sistemnom podkhode k razrabotke metodik kontsentririrovaniya primesei otgonkoi osnovy proby v analize veshchestv vysokoichistoty. *Analitika I kontrol'*. 1998;3-4:26-40.
4. Dias ALB, Cunha GN, Santos P, et al. Fusel oil: Water adsorption and enzymatic synthesis of acetate esters in supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018;142:22-31.
5. Dias ALB, Santos dos P, Martínez J. Supercritical CO₂ technology applied to the production of flavor ester compounds through lipase-catalyzed reaction: a review. *Journal of CO₂ Utilization*. 2018;23:159-178.
6. Santos dos P, Meireles M.A.A, Martínez J. Production of isoamyl acetate by enzymatic reactions in batch and packed bed reactors with supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017;127:71-80.
7. Montoya N, Duran J, Cordoba F, et al. Colombian fusel oil El aceite de fusel de Colombia. *Ingenieria e Investigacion*. 2016;36:21-27.
8. Santos P, Rezende C.A, Martinez J. Activity of immobilized lipase from *Candida antarctica* (Lipozyme 435) and its performance on the esterification of oleic acid in supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2016;107:170-178.
9. Santos P, Zabot GL, Meireles M.A.A, et al. Synthesis of Eugenyl Acetate by Enzymatic Reactions in Supercritical Carbon Dioxide. *Biochemical Engineering Journal*. 2016;114:1-9.
10. Zuway KY, Smith JP, Foster CW, et al. Detection and quantification of new psychoactive substances (NPSs) within the evolved "legal high" product, NRG-2, using high performance liquid chromatography-amperometric detection (HPLC-AD). *Analyst*. 2015;140:6283-6294.

11. Rivoira L, De Carlo RM, Cavalli S, et al. Simple SPE-HPLC determination of some common drugs and herbicides of environmental concern by pulsed amperometry. *Talanta*. 2015;131:205-212.
12. Butler O, Forder J, Saunders J. Analytical protocol for the sensitive determination of mannitol, sorbitol and glucose containing powders in pharmaceutical workplaces by ion chromatography using a pulsed amperometric detector. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2015;106:204-209.
13. Chizhkov VP, Boitsov VN. Obobshchennaya teoriya khromatografii i mnogostupenchatoi zhidkostnoi ekstraktsii. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2017;91(3):549-557.
14. Kartashova AA, Novikov VF. Opredelenie furanovykh soedinenii v transformatornom masle gazokhromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem novykh sorbentov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;1-2:47-52.
15. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva AV. Instrumental'nye metody analiza. V trekhchastyakh. Ch.III. Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov v energetike: Monografiya. Pod redaktsiei professora VF. Novikova. Kazan': Kazan. gos. energ. un - t. 2018. 328 P.
16. Burov AI, Tyurin AN, Yakimov AV. i dr. Tseolit sodержashchie porody Tatarstana I Ikh primeneniye. Kazan': izdatel'stvo «FEN» ANRT. 2001. 176 P.

Authors of the publication

Vu Ngoc Dan – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vyacheslav F. Novikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

16 октября 2020 г.

Отредактировано

19 ноября 2020г.

Принято

03 декабря 2020г.



ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ ГАЗО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Нгуен Зуи Хынг, Ю.В. Снигирева, А.В.Танеева, В.Ф. Новиков

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

hungnguyenat73@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. В работе рассмотрено влияние природы органических растворителей на процесс разделения антиокислительной присадки, добавляемой в трансформаторное масло в концентрации до 0,40% от массы, и органических растворителей, используемых в качестве селективных экстрагентов. На основе анализа литературных данных показано, что минеральное трансформаторное масло представляет собой сложную углеводородную композицию, которая в процессе эксплуатации подвергается окислительной деструкции, приводящей к старению трансформаторного масла и ухудшению технических условий эксплуатации трансформаторного электрооборудования. В результате этого процесса в трансформаторном масле появляются перекисные соединения, оказывающие влияние на его цвет, стабильность к окислению, устойчивость к старению, совместимость с конструкционными деталями оборудования и др. Для определения в трансформаторном масле антиокислительной присадки «Ионол» и органических экстрагентов использовали метод газо-жидкостной хроматографии. Эксперименты проводили на Хроматографе Хромос ГХ-1000 с пламенно-ионизационным детектором и кварцевой капиллярной колонкой длиной 30м, внутренним диаметром 0,32мм, заполненной неподвижной жидкой фазой ValkoBondVB-WAXP/n с толщиной пленки 0,5мкм. Дозировку пробы в инжектор газо-жидкостного хроматографа проводили с помощью автоматического жидкостного дозатора ДАЖ-23, рассчитанного на ввод до двадцати трех проб сорбатов и управляемого компьютером с соответствующим программным обеспечением.

МЕТОДЫ. В качестве экстрагентов антиокислительной присадки исследовали алифатические спирты от C_1 до C_5 , которые хорошо разделяются с ионолом как в изотермических условиях, так и в режиме линейного программирования температуры колонки от 40 до 220 °С. В этих условиях получены хроматограммы разделения антиокислительной присадки и алифатических спиртов, на основе которых рассчитаны их относительные удерживаемые объёмы, коэффициенты асимметрии хроматографических пиков и эффективность колонки, которая зависит от физико-химической природы анализируемых сорбатов и условий проведения хроматографического эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлена зависимость относительного объёма удерживания алифатических спиртов от их диэлектрической проницаемости, которая имеет нелинейный вид. При этом с уменьшением длины цепи алкильных заместителей в молекуле алифатических спиртов наблюдается тенденция повышения их диэлектрической проницаемости. Зависимость относительного удерживаемого объёма алифатических спиртов от коэффициента селективности разделения с Ионолом является линейной. При этом наиболее оптимальная селективность разделения, приближающаяся к единице, является характерной для пары Ионол–Бутанол-1. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов от их температур кипения является линейной как при низкой температуре хроматографической колонки (40 °С), так и при более высокой (более 100 °С). При этом в области температур кипения органических растворителей изменяется угол наклона соответствующих прямых, что связывается с изменением механизма сорбции в капиллярной хроматографической колонке, заполненной полярной неподвижной фазой.

Ключевые слова: трансформаторное масло, электрооборудование, контроль, сорбат, сорбент, экстрагент, хроматография, удерживание, растворитель.

Для цитирования: Нгуен Зуи Хынг, Снигирева Ю.В., Танеева А.В., Новиков В.Ф. Влияние природы органических растворителей на процесс разделения антиокислительной присадки в трансформаторном масле газо-хроматографическим методом // Известия высших учебных

**INFLUENCE OF THE NATURE OF ORGANIC SOLVENTS ON THE PROCESS
OF SEPARATION OF ANTIOXIDATIVE ADDITIVE IN A TRANSFORMER OIL
BY A GAS-CHROMATOGRAPHIC METHOD**

Nguyen Duy Hung, Snigireva YuV, Taneeva AV, Novikov VF

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

hungnguyenat73@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* The paper considers the influence of the nature of organic solvents on the process of separation of an antioxidant additive added to transformer oil at a concentration of up to 0.40% by weight, and organic solvents used as selective extractants. Based on the analysis of literature data, it is shown that mineral transformer oil is a complex hydrocarbon composition that undergoes oxidative degradation during operation, leading to aging of transformer oil and deterioration of technical conditions of operation of transformer electrical equipment. As a result of this process, peroxide compounds appear in transformer oil, which affect its color, oxidation stability, aging resistance, compatibility with structural parts of equipment, etc. Gas-liquid chromatography was used to determine the "Ionol" antioxidant additive and organic extractants in transformer oil. Experiments were performed on a chromatograph of Chromosomes GC-1000 with a flame ionization detector and a quartz capillary column 30 m long, 0.32 mm in diameter, filled with a fixed liquid phase Valko Bond VB-WAX P/n with a film thickness of 0.5 microns. The sample was dosed into the gas-liquid chromatograph injector using an automatic liquid dispenser DAZH-23, designed for entering up to twenty-three samples of sorbates and controlled by a computer with the appropriate software.

METHODS. Aliphatic alcohols from C1 to C5 were studied as extractants of the antioxidant additive, which are well separated from the ionol both under isothermal conditions and in the mode of linear programming of the column temperature from 40 to 220 °C. Under these conditions the chromatogram of the separation of antioxidant additives, and aliphatic alcohols, which are used to calculate their relative retained volumes, the asymmetry of chromatographic peaks and the column efficiency, which depends on the physico-chemical nature of the solutes to be analyzed and the conditions of the chromatographic experiment.

RESULTS. The dependence of the relative volume of retention of aliphatic alcohols on their permittivity, which has a nonlinear form, is established. At the same time, with a decrease in the chain length of alkyl substituents in the aliphatic alcohol molecule, there is a tendency to increase their permittivity. The dependence of the relative retained volume of aliphatic alcohols on the selectivity coefficient of separation with Ionol is linear. In this case, the most optimal separation selectivity, approaching one, is characteristic of the Ionol – Butanol-1 pair. It is shown that the dependence of the logarithm of the retention time of aliphatic alcohols on their boiling points is linear both at a low temperature of the chromatographic column (40 °C) and at a higher temperature (more than 100 °C). *CONCLUSION.* At the same time, the angle of inclination of the corresponding lines changes in the boiling point of organic solvents, which is associated with a change in the sorption mechanism in a capillary chromatographic column filled with a polar stationary phase.

Key words: transformer oil, electrical equipment, control, sorbate, sorbent, extractant, chromatography, retention, solvent.

For citation: Nguyen Duy Hung, Snigireva YuV, Taneeva AV, Novikov VF. Influence of the nature of organic solvents on the process of separation of antioxidative additive in a transformer oil by a gas-chromatographic method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):211-220. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-211-220.

Введение

Минеральное трансформаторное масло представляет собой очищенную фракцию нефти, кипящую при температуре от 300 до 400⁰С. В своем составе трансформаторное масло содержит от 10 до 15% парафиновых углеводородов, от 60 до 70% нафтеновых, от 15

до 20% ароматических углеводородов. Кроме того, в состав трансформаторного масла входят асфальто-смолистые вещества, сернистые и азотистые соединения а также нафтеновые кислоты [1]. В процессе эксплуатации силового маслонаполненного электрооборудования трансформаторное масло постоянно стареет, в результате чего ухудшаются его эксплуатационные характеристики и диэлектрические свойства. Поэтому важным свойством трансформаторного масла является его способность поддерживать технологические параметры, необходимые для длительной эксплуатации.

Для увеличения стабильности трансформаторного масла против окисления в него вводят антиоксидантную присадку 2,6-ди-трет-бутил-пара-крезол, торговое название «Ионол», которая вступает во взаимодействие с активными перекисными радикалами, обрывая их цепи [2-4]. Этот механизм ингибирования является обобщением и реализуется для всех фенольных антиоксидантов, например, 4,4'- бис (2,6-ди-трет-бутилфенол) который используется в качестве антиоксидантов в различных полимерных системах [5-7].

Установлено, что ионол успешно проявляет себя при взаимодействии с пластмассами, каучуками и подобными веществами. При использовании ионола возможно продлить время работы трансформаторного масла в 2-3 раза. Он также растворяется в масле при температуре в 30 °С, что дает возможность его использовать в качестве присадки, добавляемой в восстановленные трансформаторные масла практически при комнатной температуре. Еще одно достоинство ионола состоит в том, что его можно хранить после регенерации около трех лет и при этом он сохраняет свои антиокислительные свойства [8].

Основная причина старения трансформаторного масла заключается в окислительной деструкции их углеводородных компонентов, которая протекает по цепному свободно-радикальному механизму. Этот процесс сопровождается появлением в трансформаторном масле пероксидных соединений, а на поздних стадиях также кетонов, альдегидов, низкомолекулярных кислот и спиртов. Появление перекисных соединений оказывает влияние на физико-химические свойства трансформаторного масла и его цвет, стабильность к окислению устойчивость к старению, совместимость с другими материалами [9-10].

Трансформаторное масло является хорошей информационной средой и диагностическими признаками, которые позволяют вовремя получать информацию о техническом состоянии маслонаполненного электрооборудования по результатам анализа стабильности масла против окисления. При этом эффективность действия антиокислительных присадок сильно зависит от химической структуры трансформаторного масла и его физико-химических характеристик [11-12].

Для определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле используют хроматографические методы анализа, которые характеризуются хорошей воспроизводимостью получаемых результатов и низким пределом обнаружения [13-15].

Прямой хроматографический анализ антиокислительной присадки затруднен, так как трансформаторное масло имеет сложный углеводородный состав с широким интервалом температур кипения. Поэтому для ее определения используют стадию пробоподготовки трансформаторного масла с целью выделения из него ионола с последующим анализом на хроматографической аппаратуре. Наиболее часто для извлечения антиокислительной присадки из трансформаторного масла используют процесс жидкостной экстракции органическими растворителями, в качестве которых наиболее часто используют этанол. В процессе экстракции ионола из трансформаторного масла многие его компоненты этанолом не извлекаются и они в процессе анализа могут накладываться на хроматографический пик ионола, что искажает достоверное определение его концентрации и может привести к ошибочным результатам. Кроме того, в большинстве случаев газохроматографический анализ антиокислительной присадки проводится с использованием насадочных хроматографических колонок, что приводит к размыванию хроматографических пиков за счет влияния адсорбционных центров твердого носителя, не покрытых неподвижной жидкой фазой.

Присутствие воды в этаноле существенно ухудшает процесс экстракции ионола из трансформаторного масла. Поэтому необходимо выбрать экстрагенты для извлечения ионола из трансформаторного масла, которые характеризуются меньшей гигроскопичностью и в своем составе содержат незначительные количества воды и сопутствующих примесей.

Методика исследования

Экспериментальную часть работы проводили на газо-жидкостном хроматографе «Хромос ГХ – 1000», который предназначен для качественного и количественного анализа органических, неорганических, газообразных, жидких и твердых проб различных технологических объектов природного и промышленного происхождения. В хроматографе

используется многопроцессорная модульная система, в памяти которой хранятся рабочие настройки. Для проведения экспериментов использовали капиллярную колонку длиной 30 м, внутренним диаметром 0,32 мм, заполненную неподвижной фазой *Vako BoHa VB WAX P/n*, с толщиной пленки 0,5 мкм.

В качестве газа носителя использовали аргон, скорость которого через капиллярную колонку составляла 0,85 мл/мин. Скорость водорода 25 мл/мин, воздуха 250 см³/мин. Детектирование разделенных компонентов проводилось пламенно – ионизационным детектором с уровнем флуктуационных шумов нулевого сигнала не более $1 \cdot 10^{-14}$ А, с пределом детектирования по гептану в нонане $2,0 \cdot 10^{-14}$ г/с.

Дозировку пробы в инжектор газо-жидкостного хроматографа проводили с помощью дозатора автоматического жидкостного ДАЖ - 23, рассчитанного на ввод в испаритель хроматографа до двадцати трех образцов проб.

Определяли абсолютные времена удерживания анализируемых соединений на основе которых рассчитывали относительные объемы удерживания антиокислительной присадки:

$$V_{\text{отн}} = \frac{t_x - t_0}{t_{ct} - t_0} \quad (1)$$

где: t_x – время удерживания анализируемого компонента, мин; t_{ct} – время удерживания стандартного соединения, мин; t_0 – время удерживания несорбируемого компонента, мин.

При определении мёртвого объёма хроматографической колонки необходимо знать время удерживания несорбирующего компонента. Для его определения часто используют для пламенно-ионизационного детектора метан. Однако в условиях капиллярно-жидкостной хроматографии метан также может сорбироваться [16]. Поэтому нами использовался расчетный метод, который заключается в том, что в случае определения времени удерживания несорбирующего компонента используют линейную зависимость объёмов удерживания гомологических веществ от числа из атомов углерода. Вычисление этим методом проводили путем измерения отрезков на хроматограмме по расстоянию удерживания по схеме, приведенной на Рис.1.

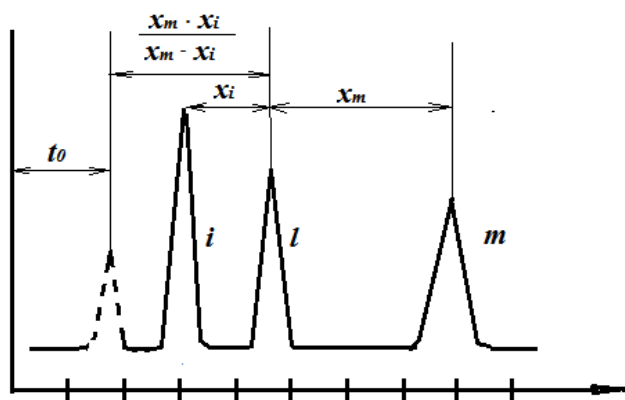


Рис.1. Графический способ оценки времени удерживания несорбирующего компонента.

Полученное соотношение для определения мертвого объема непосредственно из хроматограммы и рассчитывается по следующей формуле [2]:

$$t_0 = t_i \frac{X_i \cdot X_m}{X_m - X_i} \quad (2)$$

где t_0 – время удерживания несорбирующего компонента; x_i и x_m – отрезки на хроматограмме между максимумов пиков компонентов i и m.

Для оценки «мертвого» объема хроматографической колонки в качестве компонента m использовали антиокислительную присадку «Ионол», а в качестве компонентов i и l – алифатические спирты.

В качестве стандартного соединения для определения относительного удерживаемого объема алифатических спиртов и антиокислительной присадки использовали н-Гексан. Коэффициент селективности хроматографической колонки при

разделении алифатических спиртов и антиокислительные присадки ионола рассчитывали как:

$$K_C = 2 \frac{t_{R_2} - t_{R_1}}{t_{R_2} - t_{R_1}} \quad (3)$$

где: t_{R_2} – абсолютное время удерживания алифатического спирта, мин; t_{R_1} – абсолютное время удерживания ионола, мин.

Для сбора и обработки хроматографических данных использовали программное обеспечение «Хромос», которые позволяет рассчитывать как качественный состав так и количественные содержания анализируемых компонентов.

Обсуждение результатов

Одним из основных методов продления срока эксплуатации трансформаторного масла является введение в него антиокислительной присадки, которая предотвращает образование осадков на твердых частях маслonaполненного электрооборудования и не изменяет физико-химических и эксплуатационных характеристик масла в течение достаточно продолжительного периода времени. В качестве антиокислительной трансформаторной присадки наиболее часто используют ионол, который относится к пространственно - затрудненным фенолам. Активированные молекулы ионола взаимодействуют с перекисными радикалами углеводородов трансформаторного масла и обрывают цепи окисления. Контроль содержания ионола в трансформаторном масле в основном осуществляется различными вариантами хроматографии: высокоэффективной жидкостной, газо - жидкостной и тонкослойной. Наиболее часто используют вариант газо-жидкостной хроматографии с использованием как насадочных так и капиллярных колонок. Трансформаторное масло представляет собой сложную смесь углеводородных и неуглеводородных композиций, кипящих в широком температурном интервале. Прямой хроматографический анализ ионола в трансформаторном масле является затруднительным, так как тяжелые компоненты трансформаторного масла будут загрязнять хроматографическую колонку, которую необходимо будет постоянно регенерировать, что существенно увеличивает время проведения эксперимента. Обычно для решения этой проблемы проводят процедуру пробоподготовки трансформаторного масла. С этой целью наиболее часто используют жидкостную экстракцию ионола из трансформаторного масла этанолом, который содержит значительное количество воды, оказывающей негативное влияние на процесс экстракции. Кроме того, в процессе газо-хроматографического анализа этанола присутствующая в нем вода подвергает гидролизу неподвижную жидкую фазу в хроматографической колонке, что существенно сокращает срок её эффективной эксплуатации. Для анализа ионола совместно с органическими растворителями, в качестве которых использовали алифатические спирты, применяли метод газо-жидкостной хроматографии. Анализ проводили на высокоэффективной хроматографической колонке в режиме программирования температуры.

На рис. 2 приведена хроматограмма разделения индивидуальных компонентов алифатических спиртов и ионола, которая показывает достаточно четкое их разделение.

При этом время удерживания ионола составляет около 38 мин, и этанола 8 мин, это приводит к тому, что в период времени около 30 мин хроматограф работает непроизводительно, так как расходуются энергетические ресурсы, газ - носитель, водород, воздух, изнашивается технологических детали хроматографа и т.д. Поэтому представляется целесообразным для извлечения ионола из трансформаторного масла использовать более высококипящие алифатические спирты, физико-химические свойства которых приведены в табл. 1.

Как видно из табл. все алифатические спирты имеют самые различные температуры кипения и близкие значения плотности. Для алифатических спиртов самая высокая диэлектрическая проницаемость характерна для метанола и она снижается по мере повышения температуры кипения спиртов. Для разветвленных спиртов, как правило, диэлектрическая проницаемость ниже, чем для нормальных. Например для бутанола - 1 $\epsilon_{20} = 17,7$ и для бутанола - 2 $\epsilon_{20} = 8,8$.

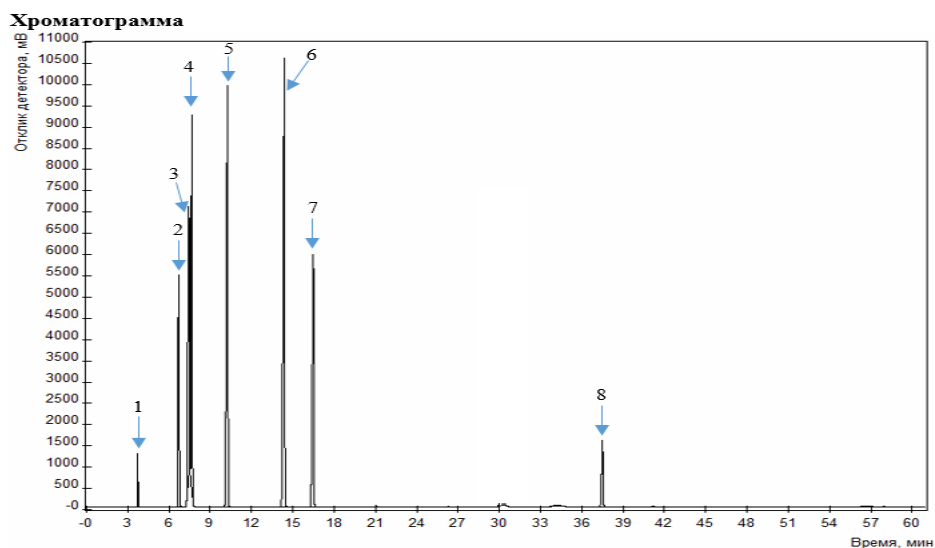


Рис. 2. Хроматограмма разделения индивидуальных компонентов и Инола на капиллярной колонке. Условия анализа: Хроматограф марки «Хромос ГХ - 1000», с пламенно-ионизационным детектором, колонка капиллярная кварцевая длиной 30 м., с внутренним диаметром 0,32 мм, заполненная *ValkoBondVB-WAXP/nCF* 5903032050A. С толщиной пленки 0,5 мкм, со ступенчатым программированием температуры, с началом 50°C, выдержка при этой температуре до 220°C со скоростью 5° и выдержка при этой температуре 5 мин. Порядок выхода компонентов: 1. Метанол; 2 – Пропанол -2; 3. Этанол; 4 – Пропанол -1; 5– Бутанол -2; 6 – Бутанол -1; 7– Аминол – 2; 8 – Инол.

Таблица 1

Физико-химические и хроматографические свойства органических экстрагентов и антиокислительной присадки «Инол» для трансформаторного масла. $T_{кип.}^0$ – Температура кипения экстрагентов; ρ_d^{20} – плотность при температуре 20°C; ϵ_{20} – диэлектрическая проницаемость; $H_2O, \%$ – массовый процент воды; N_M – число теоретических тарелок на один метр хроматографической колонки; K_A – коэффициент асимметрии хроматографических пиков; $t_{уд.}$ – Абсолютно время удерживания анализируемого сорбата, мин.

$N_{\text{т.т.}}$	вещество	$T_{кип.}^0, ^\circ\text{C}$	$\rho_d^{20}, \text{г/см}^3$	ϵ_{20}	$H_2O, \%$	N_M Т.Т.	K_A	$t_{уд.}$ мин	$V_{отн.}$
1	Н-Гексан	69,0	0,66	1,9	0,01	39	0,66	1,86	1,00
2	Метанол	64,7	0,79	33,0	0,08	790	1,95	3,71	1,99
3	Этанол	78,4	0,81	25,0	4,00	742	0,61	7,44	4,00
4	Пропанол - 2	82,6	0,78	19,0	0,10	1103	1,08	6,70	3,60
5	Пропанол - 1	97,0	0,80	21,0	0,10	1699	0,61	7,65	4,11
6	Бутанол - 2	108,0	0,80	8,80	0,20	1518	0,41	10,24	5,50
7	Бутанол - 1	118,0	0,81	17,7	0,05	2683	0,33	14,38	7,73
8	Аминол - 2	132,0	0,81	14,7	0,10	3527	0,40	16,49	8,86
9	Инол	265,0	1,048	-	-	22120	0,66	37,50	20,16

При этом зависимость относительного объема удерживания алифатических спиртов от их диэлектрической проницаемости является нелинейной (рис. 3)

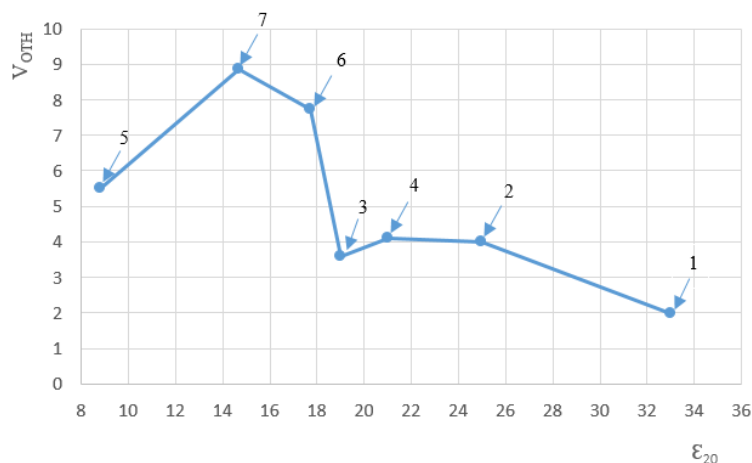


Рис. 3. Зависимость относительного объема удерживания алифатических спиртов ($V_{отн}$) от их диэлектрической проницаемости (ϵ_{20}). 1. Метанол; 2. Этанол 3. Пропанол -2; 4. Пропанол -1; 5. Бутанол -2; 6. Бутанол -1; 7. Аминол – 2

В табл. 2 приведены численные значения коэффициентов селективности разделения антиокислительной присадки и ионола на капиллярной колонке с программированием температуры а также разницы температур их кипения. Как видно из табл. с уменьшением разности температур кипения ионола и алифатических спиртов, их разделение в процессе программирования температуры хроматографической колонки падает. При этом, как следует из рис.4, зависимость относительного объема удерживания алифатических спиртов от коэффициента селективности их разделения с ионолом является линейной.

Таблица 2
Коэффициенты селективности разделения ионола и алифатических спиртов (K_c) и разницы температур их кипения ($\Delta T, ^\circ C$).

Нпп	Компоненты	K_c	$\Delta T, ^\circ C$
1	Ионол - Метанол	1,64	200,3
2	Ионол - Пропанол - 2	1,39	182,4
3	Ионол - Этанол	1,34	186,6
4	Ионол - Пропанол - 1	1,32	168,0
5	Ионол - Бутанол - 2	1,14	157,0
6	Ионол - Бутанол - 1	0,89	147,0
7	Ионол - Аминол - 2	0,79	133,0

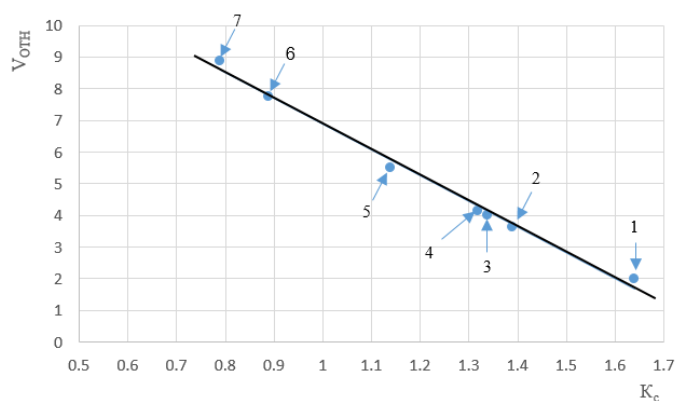


Рис. 4. Зависимость относительного удерживаемого объема алифатических спиртов $V_{отн}$ от коэффициента селективности разделения K_c : 1. Ионол – Метанол; 2. Ионол – Пропанол-2 – 1; 3. Ионол – Этанол; 4. Ионол – Пропанол – 1; 5. Ионол - Бутанол – 2; 6. Ионол - Бутанол –1; 7. Ионол - Аминол – 2

На рис. 5 приведена зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов от их температуры кипения. Это зависимость имеет линейный вид для высококипящих алифатических спиртов. Для низких членов гомологического ряда (метанол, этанол, изо-пропанол) наблюдается аномальное поведение. При этом при температуре 100⁰ алифатические спирты на исследуемой капиллярной колонке практически не разделяются. По-видимому, это связано с тем, что при высокой температуре (100⁰С) процесс разделения низкокипящих спиртов в хроматографической колонке протекает в парообразном состоянии и их разделение происходит по дисперсионному механизму. Очевидно, это связано с тем, что способность к образованию межмолекулярной водородной связи в системе сорбат-сорбент с повышением температуры падает, что приводит к снижению гидроксильной селективности разделения алифатических спиртов, обладающих протонодонорной способностью, и антиокислительной присадки.

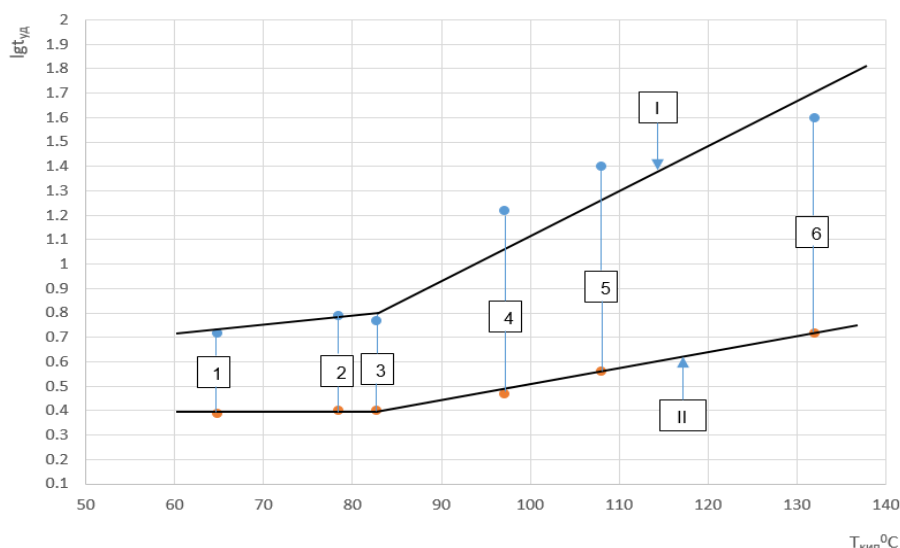


Рис. 5. Зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов от их температуры кипения. Температура хроматографической колонки 40⁰С – I и 100⁰С – II. 1. Метанол; 2. Этанол 3. Пропанол -2; 4. Пропанол -1; 5. Бутанол -2; 6. Аминол – 2

Заключение

Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований, для определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле перспективным является использование бутанола в качестве органического экстрагента.

Литература

- Петрова В.В. Типы присадок для трансформаторного масла // European Science. 2018. №6 (38). С.10-13.
- Sarathi R., Yadav K.S., Swarna V. Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N 5. pp. 2513-2521.
- Zukowski P., Koltunowicz T., Kierczynski K., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N 4. pp. 2156-2164.
- Thirugnanam R., Siluvairaj M., Radha K. Retreatment of aged mineral oil using semiconductive nanocomposites for power transformer application // Int. Trans. Elect.r Energ. Syst. 2017. V.27. I.9. e2358.
- Hasan M.I. Improving the cooling performance of electrical distribution transformer using transformer oil. Based MEPCM suspension // Eng. Sci. and Tech.,an Int. J. 2017. V. 20. pp. 502-510.
- Badaruddin Y. Gunardi F., Firdianto A. Analysis on the quality of three-phase transformer oil // International Research Journal of Computer Science (IRJCS). 2017. V. 4. I.1. pp.1-7.
- Андреев Л.Н., Павлова П.П., Пинигин С.А. Изучение расхождение ионола в трансформаторном масле // Современная техника и технология. 2017. №3 (67). С.6-10.
- Davydov V.G., Zielinski. T., McPherson. L. Factory and Field Experience with Monitoring of vegetable oil Transformer // Proc. of 45th CJGRE Session, Paris. 2014. pp A2-301.
- Kumar K.K., Rajesh S.L. Biofuel Production Using Butanol and Used Transformer Oil // Int. Res. J.I of Eng. and Techn. (IRJET). 2016. V. 3. I.7. pp. 2162- 2168.

10. Saha T.K., Purkait P. Transformer Insulation Materials and Ageing. / Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques. 2017. 33p. <https://doi.org/10.1002/9781119239970.ch1>
11. Waghmare H. Transformer oil analyses. 2019. 12p. https://www.academia.edu/6518091/Transformer_Oil_Analysis (electronic resource).
12. Razzaq A., Zainuddin H., Hanaffi F., et al. Measurement of ester-based transformer oil aging using tapered single mode-multimode-single mode fiber structure // Microwave and Optical Technology Letters. 2019. V. 62. I.2. pp.559-564.
13. Новиков В.Ф. Диагностика маслonaполненного электрооборудования хроматографическими методами // Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. Монография в трех томах. Под ред. Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. Качество энергоснабжения, энергоэффективности и экология. Казань, 2018. Т.3. С.139 -160.
14. Новиков В.Ф., Картасова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. В трех частях. Ч.3. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: Монография. Под редакцией профессора В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун -т. 2018. 328с.
15. Zaitseva E.A., Dolgonos A.M. Three-Parameters model of intermolecular interactions as a basis for classification and selection of fixed phases for gas chromatography // Sorption and chromatographic processes. 2019. V.19. N5. pp.-525-541.
16. Кнох J.H., McLaren L. Anal. Chem. 1963. V. 35. 449p.
17. Супина В. Насадочные колонки для газовой хроматографии. Мир. 1977. 256с.

Авторы публикации

Нгуен Зуи Хынг – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Снигирева Юлия Вячеславовна – зав. учебной лабораторией, аспирант, кафедра «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Танеева Алина Вячеславовна – канд. хим. наук, доцент, кафедра «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, профессор, кафедра «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Petrova VV. Types of additives for transformer oil. *European Science*. 2018;6(38):10-13.
2. Sarathi R, Yadav K, Swarna V. *Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015;22(5):2513-2521.
3. Zukowski P, Koltunowicz T, Kierczynski K, et al. *An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015;22(4):2156-2164.
4. Thirugnanam R, Siluvairaj M, Radha K. Retreatment of aged mineral oil using semiconductive nanocomposites for power transformer application. *Int. Trans. Elect.r Energ. Syst.* 2017;27(9):2358. <https://doi.org/10.1002/etep.2358>.
5. Hasan MI. Improving the cooling performance of electrical distribution transformer using transformer oil – Based MEPCM suspension. *Eng. Sci. and Tech., an Int. J.* 2017;20:502-510.
6. Badaruddin Y, Gunardi F.A, Firdianto. Analysis on the quality of three-phase transformer oil. *International Research Journal of Computer Science (IRJCS)*. 2017;4(1):1-7.
7. Andreev LN, Pavlova PP, Pinigin SA. The Study of the expenditure of ionol in transformer oil. *Modern equipment and technology*. 2017;3 (67):6-10.
8. Davydov VG, Zielinski T, McPherson L. *Factory and Field Experience with Monitoring of vegetable oil Transformer*. Proc. of 45th CJGRE Session, Raris. 2014.
9. Kumar KK, Rajesh SL. Biofuel Production Using Butanol and Used Transformer Oil. *Int. Res. J.I of Eng. and Techn. (IRJET)*. 2016;3(7):2162- 2168.
10. Saha TK, Purkait P. Transformer Insulation Materials and Ageing. *Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques*. 2017. 33p. <https://doi.org/10.1002/9781119239970.ch1>

11. Waghmare H. Transformer oil analyses. 2019. 12p. https://www.academia.edu/6518091/Transformer_Oil_Analysis(electronic resource).
12. Razzaq A, Zainuddin H, Hanaffi F, et al. A Measurement of ester-based transformer oil aging using tapered single mode-multimode-single mode fiber structure. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2019;62(2):559-564.
13. Novikov VF. Diagnostika maslonapolnennogo elektrooborudovaniya khromatograficheskimi metodami. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie v energetike. Monografiya*. ... Pod red. E. YU. Abdullazyanova, EV. Shamsutdinova. Kachestvo energosnabzheniya, energoeffektivnosti i ekologiya. Kazan. 2018;3:139-160.
14. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva AV. Instrumental'nye metody analiza. V trekh chastyakh. *Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov v energetike: Monografiya*. ... Kazan: Kazan. gos. energ. Un-t. 2018. 328p.
15. Zaitseva EA, Dolgonos AM. Three-Parameters model of intermolecular interactions as a basis for classification and selection of fixed phases for gas chromatography. *Sorption and chromatographic processes*. 2019;19(5):525-541.
16. Knox JH, McLaren L. *Anal. Chem.* 1963;35:449p.
17. Supina V. Packing columns for gas chromatography. Mir. 1977. 256p.

Authors of the publication

Duy H. Nguyen – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Julia V. Snigireva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alina V. Taneeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vyacheslav F. Novikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

21 ноября 2020г.

Отредактировано

10 декабря 2020г.

Принято

14 декабря 2020г.