

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Том 19 № 11-12

ноябрь-декабрь 2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1999 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:	<i>Абдуллазянов Эдвард Юнусович,</i> канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:	<i>Шамсутдинов Эмиль Васильевич,</i> канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР:	<i>Потапова Татьяна Петровна,</i> канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
РЕДАКТОР:	<i>Калинина Марина Владимировна,</i> Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
<i>Свидетельство о регистрации</i>	ПИ № 77-7322 от 19.02.2001г.
<i>ISSN</i>	1998–9903
<i>Периодичность:</i>	6 раз в год сдвоенными номерами
<i>Издатель:</i>	Казанский государственный энергетический университет, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
<i>Типография:</i>	ООО Полиграфическая компания «Астор и Я»
<i>Сайт:</i>	http://www.unei.ru
<i>Адрес:</i>	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
<i>Email:</i>	problems_ener@mail.ru
<i>Прием статей:</i>	mail@unei.ru
<i>Тел./факс:</i>	+7 (843) 527-92-76
<i>Подписка:</i>	Каталог «Газеты и журналы» Агентства «Роспечать» - индекс 79586

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

№ 11-12

ноябрь-декабрь 2017

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ**

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1999 ГОДА

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ЭНЕРГЕТИКА

СУХОЦКИЙ А.Г., СИДОРИК Г.С. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб	3
ЗАКАРЮКИН В.П., КРЮКОВ А.В., АЛЕКСЕЕНКО Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог	12
КУЛИКОВ А.Л., ВУКОЛОВ В.Ю., КОЛЕСНИКОВ А.А., ШАРЫГИН М.В. Дифференциальная защита шин 110-220 кВ с применением метода двойной записи	21
ИВАНИЦКИЙ М.С. Моделирование влияния температурного уровня в зоне активного горения на содержание оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания котельных установок систем теплоснабжения. Часть 3. Интенсивность образования ПАУ в характерных температурных зонах факела	32
СОЛОДОВА Н.Л., ЧЕРКАСОВА Е.И., САЛАХОВ И.И., ТУТУБАЛИНА В.П. Водород - энергоноситель и реагент. Технологии его получения	39
ДАНЬКО В.П., ДОРОШЕНКО А.В. Альтернативные системы жизнеобеспечения на основе цикла с непрямой регенерацией абсорбента	51
АМИНОВ Р.З., НОВИЧКОВ С.В. Использование абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины для повышения эффективности работы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции	62
МУССОНОВ Г.П., СЕЛЕЗНЕВ А.С., ФЕДЧИШИН В.В. Повышение точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах	73
СТЕННИКОВ В.А., БАРАХТЕНКО Е.А., СОКОЛОВ Д.В., ШЕЛЕХОВА В.Б. Активное участие потребителя в управлении своим энергоснабжением	88
ВАЛИЕВ Р.Н., ЗИГАНШИН Ш.Г., ВАНЬКОВ Ю.В., ГАРИПОВ Р.Р. Повышение эффективности парогазовой установки с котлом-утилизатором за счет включения в схему абсорбционного преобразователя теплоты	101
ЛАПТЕВ А.Г., БАШАРОВ М.М., ФАРАХОВ Т.М. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах с интенсификаторами процесса	112

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

МРАКИН А.Н., СОТНИКОВ Д.Г., АФАНАСЬЕВА О.В. Разработка энергохимической установки с комбинированной выработкой энергоносителей и технологического газа	119
--	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

КРАСНОШЛЫКОВ А.С., КУЗНЕЦОВ Г.В. Численный анализ температурных полей литий-ионного аккумулятора в условиях высоких токовых нагрузок	126
--	-----

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ШИЛИН А.А., ДЕМЕНТЬЕВ С.С. Устройство видеоизмерения линейного габарита для оценки интенсивности оледенения ЛЭП	135
---	-----

ФИЗИКА

КИСЕЛЕВ В.Г. Изотермическое расширение идеального газа и химическое сродство	142
--	-----

К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

КОЗЛОВ В.К., РИЗВАНОВА Г.И., ВАЛИУЛЛИНА Д.М. Возможность применения кристаллогидратов хлорида кобальта для осушки трансформаторных масел	152
--	-----

CONTENS	157
---------------	-----

Указатель статей за 2017 год	159
------------------------------------	-----

Правила оформления статей	165
---------------------------------	-----

**ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОКОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ
ОДНОРЯДНЫХ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ШАГАХ УСТАНОВКИ ТРУБ**

А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик

**Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,
Республика Беларусь**

alk2905@mail.ru, galiana.sidorik@gmail.com

Резюме: В статье представлено исследование однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников, состоящих из биметаллических накатных алюминиевых ребристых труб с различными поперечными шагами их установки, оснащенных дополнительным интенсифицирующим устройством – вытяжной шахтой, различной высоты. Проанализирована методика обработки полученных опытных данных и представлены зависимости чисел Нуссельта от чисел Грасгофа. Проанализирована физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный ребренный пучок. Установка вытяжной шахты над пучком приводит к значительному росту теплоотдачи в 2,5-3,0 раза, но при этом эффективность теплоотдачи существенно зависит от высоты вытяжной шахты, ее аэродинамического сопротивления и поперечного шага установки труб в теплообменном пучке. Для смешанноконвективного теплообмена зависимость теплоотдачи от поперечного шага установки труб имеет отличный характер по сравнению со свободноконвективным теплообменом.

Ключевые слова: воздухоохлаждаемый теплообменник, естественная конвекция, биметаллическая ребристая труба, вытяжная шахта, число Грасгофа, число Нуссельта, подъемно-вытяжной перепад давления, коэффициент теплоотдачи.

**INVESTIGATION OF A MIXED-CONVECTIVE HEAT TREATMENT OF SINGLE-
AIR AIR COOLED EXCHANGERS IN VARIOUS CROSS-STEPS PIPE INSTALLATION**

A. B. Sukhotskii, G. S. Sidorik

Belarussian state technological university, Minsk, Republic of Belarus

alk2905@mail.ru, galiana.sidorik@gmail.com

Abstract: The article presents a study of single-row air-cooled heat exchangers consisting of bimetallic rolling aluminum finned tubes with different transverse steps of their installation, equipped with an additional intensifying device - a suction shaft, of various heights. The methodology of processing the obtained experimental data is analyzed and the Nusselt numbers reliance on Grashof numbers are presented. The physical picture of the air flow structure passing through a single-row horizontal finned beam is analyzed. Because of the analysis, it was concluded that the installation of the exhaust shaft above the beam leads to a significant increase in heat transfer by a factor of 2.5-3.0, but the efficiency of heat transfer depends on the height of the extraction shaft and on the back spacing. In such case the mixed convective heat transfer reliance

on back spacing is differed from a character of dependence as compared to free convection heat exchange.

Keywords: *air-cooled heat exchanger, free convection, bimetallic finned tube, exhaust shaft, Grashof number, Nusselt number, lift-and-exhaust differential pressure, heat transfer coefficient*

Применимость воздухоохлаждаемых теплообменников в различных отраслях промышленности в данный момент расширяется благодаря их экологичности и отсутствия потребности в охлаждающей воде. Наибольшее распространения этот вид теплообменников получил в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и пищевой промышленности, также применяются на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях, в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике, на атомных станциях [1].

При эксплуатации воздухоохлаждаемых теплообменников (ВОТ) актуальной задачей является снижения расхода электрической энергии на работу их вентиляторов. Одним из технических решений уменьшения энергопотребления ВОТ является перевод их работы в течение некоторого периода времени года в безвентиляторный режим, при котором отключаются все или часть вентиляторов охлаждающего воздуха, а отвод теплоты от охлаждаемого рабочего тела (продукта, энергоносителя, теплоносителя) осуществляется свободной конвекцией. Однако теплоотдача оребренных трубных пучков в условиях свободной конвекции является недостаточно изученной. Это объясняется сложностью процессов теплообмена при свободной конвекции [2, 3], особенно на ребристых поверхностях, где присутствует сопряженный теплообмен, и по этой причине становится невозможным применение теоретических методов описания и расчета в виду их громоздкости, неточности, сложности и в некоторых случаях неосуществимости [4]. Теплоотдача при естественной конвекции рассмотрена для одиночных гладких труб [5], одиночных оребренных труб, однорядных и многорядных ребристых пучков [6 – 9].

К сожалению область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение ВОТ в условиях свободной конвекции, ограничена. Но при оснащении ВОТ дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию, теплопроизводительность теплообменника может оставаться неизменной при более высоких температурах окружающего воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора. Одним из таких устройств, не потребляющим энергию, является вытяжная шахта, установленная над ВОТ для увеличения расхода охлаждающего воздуха.

Для исследования влияния вытяжной шахты на тепловую эффективность ВОТ было проведено экспериментальное исследование теплоотдачи однорядных пучков из горизонтально расположенных ребристых труб со спирально накатными алюминиевыми ребрами. Изучались трубы с поперечными шагами $S_1 = 58, 61, 64$ и 70 мм, установленные между фанерными досками толщиной 4 мм, а их торцы для снижения тепловых потерь были защищены фторопластовыми втулками. Геометрические размеры биметаллической оребренной трубы следующие, мм: диаметр $d = 56$; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26$; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно $h = 15$; $s = 2,5$; $\Delta = 0,5$; длина оребренной части трубы $l = 300$. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 21$. Вытяжная шахта с прямоугольным основанием, переходящим в цилиндрическую трубу, внутренним диаметром $0,105$ м и высотой $H_{ш} = 0,52, 1,16, 1,48, 2,1$ м устанавливалась непосредственно над однорядным пучком. Для снижения тепловых потерь вытяжная шахта снаружи покрывалась слоем минерального волокна толщиной $2-3$ см.

Теплоотдача изучалась методом полного моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Средняя труба в пучке являлась калориметром. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее

оснащение температурными датчиками, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [10]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термопар) изменялась в интервале $t_{cm} = 30 - 162$ °С, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 17 - 24$ °С, подводимая к калориметру электрическая мощность $W = 10 - 200$ Вт.

По данным измерений вычисляли средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, Вт/(м²К)

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{cm} - t_0) \cdot F}, \quad (1)$$

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт; $F = l \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \varphi$ – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м².

Тепловой поток Q_k , Вт, отведенный от трубы к воздуху конвекцией, рассчитывался из уравнения

$$Q_k = W - Q_{\lambda} - Q_n, \quad (2)$$

где W – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт; Q_{λ} – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт; Q_n – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт.

Тепловые потери через торцевые участки оребренной трубы вычислялись на основании предварительно проведенных опытов по следующей формуле [11], Вт

$$Q_n = 0,4125 + 0,08663 \cdot W - 1,41106 \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

Тепловой поток излучением рассчитывался по рекомендациям [12].

Результаты эксперимента представлялись в виде зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа:

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot d_0}{\lambda}, \quad (4)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot (t_{cm} - t_0)}{\nu^2}, \quad (5)$$

где λ , ν – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м К), и кинематической вязкости м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент температурного расширения, К⁻¹.

Определяющей температурой для определения числа Нуссельта является температура окружающего воздуха t_0 , °С.

В результате анализа полученных экспериментальных данных у автора сформировалась определенная физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный оребренный пучок, которая схематично представлена на рис. 1. Поток воздуха, проходящий через пучок, условно можно разделить на три части: межреберный (I), обтекающий (II) и межтрубный (III).

Межреберный поток движется в полостях между ребрами трубы и за счет большой поверхности контакта имеет наибольший отбор тепла и, соответственно, максимальное повышение температуры. При этом он обладает также максимальной подъемной силой, обусловленной низкой весовой плотностью, но из-за малого проходного сечения этот поток воспринимает максимальное сопротивление движению.

Обтекающий поток нагревается за счет взаимодействия с поверхности торцов ребер и смешивается с межреберным потоком. Его поведение и характеристики во многом идентичны с потоком, обтекающим гладкую трубу с диаметром равным диаметру оребрения экспериментальной трубы. Сопротивление его движению главным образом оказывает взаимодействие с межтрубным потоком воздуха.

Межтрубный поток, по сути, является паразитным, поскольку препятствует движению обтекающему потоку и непосредственно не участвует в охлаждении трубного пучка. Он практически неподвижен при свободной конвекции, а при смешанной конвекции движется за счет подъемной тяги создаваемой вытяжной шахтой.

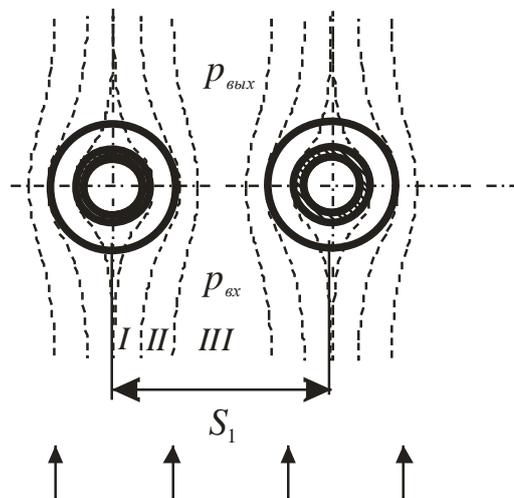


Рис. 1. Схема обтекания воздухом однорядного оребренного пучка

При этом необходимо понимать, что все потоки термодинамически взаимодействуют между собой – обмениваются тепловой и кинетической энергией. За пучком на некотором они полностью перемешиваются, их температуры и скорости выравниваются.

Также на структуру потока существенное влияние оказывает перепад давления воздуха на входе и выходе из пучка $\Delta p = p_{вх} - p_{вых}$. При естественной конвекции перепад давления равен нулю, поскольку давление на входе и выходе из пучка равно атмосферному.

При установке вытяжной шахты над пучком общее гравитационное давление пучка и шахты равно их общему аэродинамическому сопротивлению

$$\Delta p_n^{sp} + \Delta p_{ш}^{sp} = \Delta p_n^{con} + \Delta p_{ш}^c \quad (7)$$

где Δp_n^{sp} , $\Delta p_{ш}^{sp}$ – гравитационное давление пучка и шахты; Δp_n^{con} , $\Delta p_{ш}^{con}$ – аэродинамическое сопротивление пучка и шахты.

Если гравитационное давление шахты больше ее аэродинамического сопротивления $\Delta p_{ш}^{sp} > \Delta p_{ш}^{con}$, то давление за пучком меньше атмосферного (вакуум), иначе – больше атмосферного (избыточное). Следовательно, в зависимости от аэродинамических характеристик вытяжной шахты перепад на пучке $\Delta p = \Delta p_n^{sp} - \Delta p_n^{con}$ может быть и положительным и отрицательным.

Исходя из этого представления о структуре потока воздуха, обтекающего однорядный горизонтальный пучок оребренных труб, ниже представлен анализ полученных экспериментальных данных.

На рис.2 представлены в логарифмическом виде зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа для различных поперечных шагов при свободной конвекции воздуха. Как видно, максимум интенсивности теплоотдачи достигается при поперечных шагах 61 и 64 мм. Это обусловлено тем, что при больших поперечных шагах дополнительное аэродинамическое сопротивление движению обтекающему потоку создает практически неподвижный межтрубный поток. По сути, обтекание трубы воздухом аналогично обтеканию одиночной трубы. При уменьшении шага снижается межтрубное поперечное сечение и соответственно уменьшается влияние паразитного межтрубного потока. При оптимальных шагах 61 и 64 мм

межтрубный холодный поток отсутствует, обтекающий поток соседних труб объединяется в единый поток. При малых же поперечных шагах обтекающий поток оказывается зажатым между трубами и его расход снижается, что ведет к снижению теплоотдачи.

Так же на рисунке видно снижение теплоотдачи при числах Грасгофа $Gr > 4 \cdot 10^5$. Это, по-видимому, обусловлено тем, что при больших температурах из-за возрастания вязкости воздуха рост интенсивности межреберного потока практически не происходит, а интенсивность съема тепла обтекающим потоком снижается из-за уменьшения эффективности отвода тепла ребрами при больших перепадах температур. Поэтому подобное снижение интенсивности теплоотдачи при высоких числах Грасгофа для гладких труб в условиях естественной конвекции воздуха отсутствует.

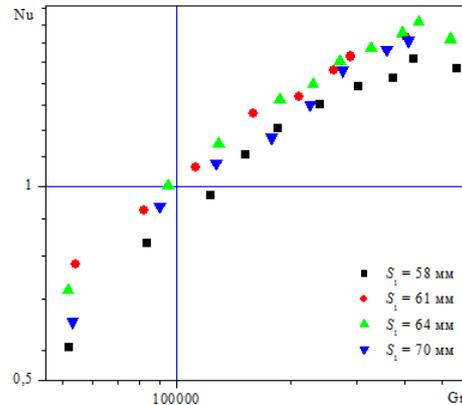


Рис. 2. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Грасгофа при различных поперечных шагах для свободной конвекции

На рис. 3, а и б представлены в логарифмическом виде зависимости $Nu = f(Re)$ для различных поперечных шагов в условиях смешанной конвекции с высотой вытяжной шахты $H_{ш} = 0,52$ и $2,12$ м, соответственно. Как видно, в отличие от свободной конвекции, для смешанной конвекции при уменьшении поперечного шага интенсивность теплоотдачи к воздуху возрастает, и максимум не наблюдается. Это обусловлено тем, что под действием гравитационного давления шахты межтрубный поток находится в активном движении и не препятствует перемещению обтекающего потока.

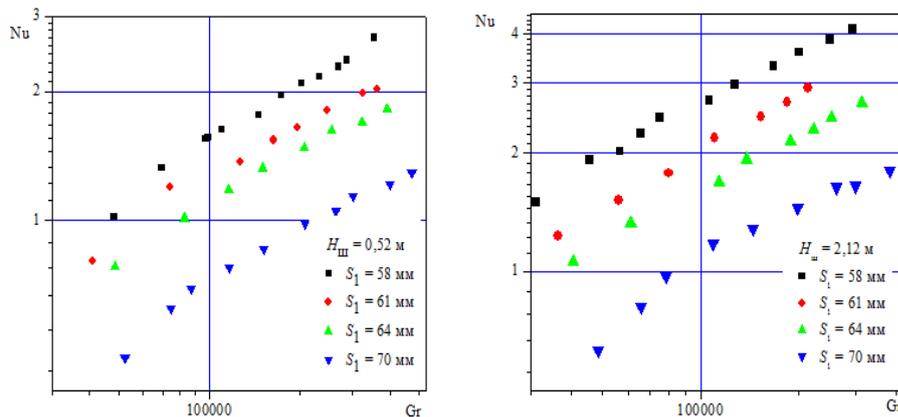


Рис. 3. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Грасгофа для различных поперечных шагов при высоте шахты: 0,52 м (а), 2,12 м (б)

На рис. 4, *a* и *б* представлены зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа для различных высот вытяжной шахты и без шахты для поперечных шагов 58 и 70 мм, соответственно. На рис. 4, *a* видно, что установка вытяжной шахты над пучком приводит к значительному росту теплоотдачи в 2,5-3,0 раза. На рис. 4, *б* наблюдается противоположная картина – установка шахты над пучком приводит к снижению числа Нуссельта и только при высоте шахты 2,12 м происходит незначительный рост теплоотдачи.

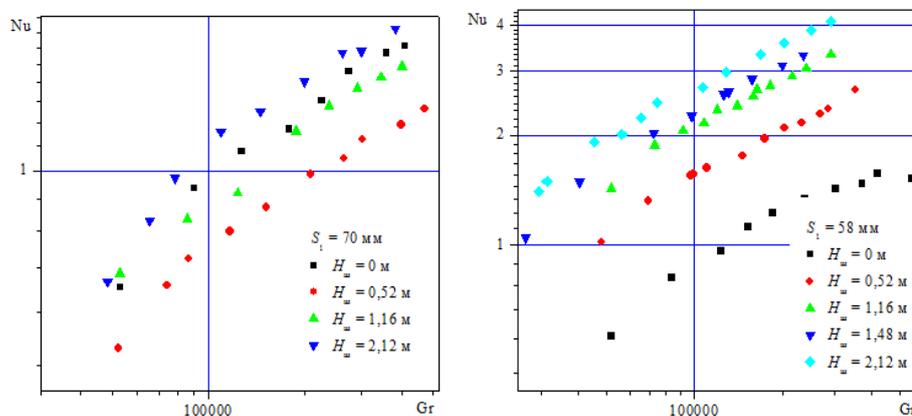


Рис. 4. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Грасгофа для различных высот шахты при поперечных шагах: 58 мм (а), 70 мм (б)

Это объясняется тем, что пучок с шагом $S_1 = 70$ мм обладает незначительным аэродинамическим сопротивлением Δp_n^{con} (проходное сечение $0,066$ м²), а при установке над ним вытяжной шахты с диаметром 105 мм (проходное сечение $0,0087$ м²) и более высоким аэродинамическим сопротивлением создается подпор, который приводит к росту давления за пучком выше атмосферного, т. е. создаются условия, при которых перепад давления воздуха на пучке становится отрицательным. В результате вытяжная шахта снижает расход межреберного и обтекающего потока воздуха. При высоте шахты 1,16 м гравитационное давление шахты уменьшает давление за пучком до примерно равного атмосферному, и теплоотдача пучка становится аналогичной, как в условиях свободной конвекции. Дальнейшее увеличение высоты шахты приводит к снижению давления за пучком, росту межреберного и обтекающего потока воздуха, увеличению теплоотдачи пучком.

На рис. 5 представлены зависимости числа Нуссельта от высоты вытяжной шахты H при различных поперечных шагах S_1 (рис. 5, *a*) и числа Нуссельта от поперечного шага S_1 при различных высотах вытяжной шахты H (рис. 5, *б*) при постоянном числе Грасгофа $Gr = 10^5$.

Как видно, наибольшее значение числа Нуссельта ($Nu = 2,64$) достигается в пучке с поперечным шагом 58 мм и высотой вытяжной шахты 2,12 м. Причем увеличение теплоотдачи по сравнению с пучком с поперечным шагом 70 мм достигается в 2,43 раза (рис. 5, *a*), а со свободной конвекцией – в 4,4 раза. Однако следует отметить, что полученные зависимости существенно зависят от аэродинамического сопротивления вытяжной шахты (главным образом диаметра) и при других ее параметрах характер зависимостей может существенно измениться. Тем не менее, полученные экспериментальные данные позволили составить общую картину процессов, происходящих в однорядном пучке в условиях смешанной конвекции, созданной с помощью вытяжной шахты.

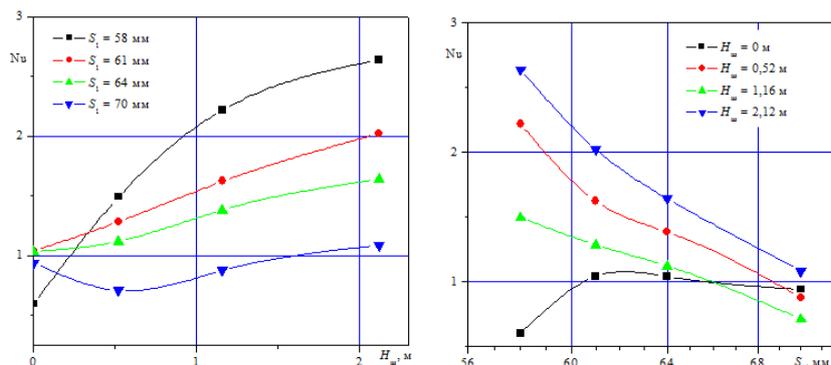


Рис. 5. Зависимости числа Нуссельта от высоты вытяжной шахты H при различных поперечных шагах S_1 (а) и от поперечного шага S_1 при различных высотах вытяжной шахты H (б) при постоянном числе Грасгофа $Gr = 10^5$

Литература

1. Кунтыш В. Б., Бессонный А. Н. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
2. Jaluria Y. Natural Convection: Heat and Mass Transfer. Oxford; New York: Pergamon Press, 1980, 326 p.
3. Gebhart V. Natural convection flows and stability. Advances in Heat Transfer, Academic Press. N.Y., Vol. 9, p. 273. 1973.
4. Кунтыш В.Б., Позднякова А.В., Третьяков П.А. Обобщение экспериментальных данных по свободной конвекции для трехрядных коридорных пучков из БРТ // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.8, 2010 г. – С. 92–94.
5. Короленко Ю. А. Теплоотдача от горизонтального пучка труб к воздуху в условиях свободной конвекции // Изв. Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. 1962. № 110. С. 26–33.
6. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: Авторефдис. канд. техн. наук 05.14.14. 1999. С. 3–22.
7. Новожилова А. В. Анализ методик определения теплоотдачи воздуха на оребренных поверхностях нагрева при свободной конвекции // Проблемы теплоэнергетики Европейского севера: сб. науч. тр. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. – С. 88–97.
8. Мартыненко О. Г., Сокоविшин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 400 с.
9. Новожилова А. В., Марьина З. Г., Львов Е. А. К расчету теплообмена коридорных пучков из биметаллических ребристых труб при различных углах наклона труб в режиме свободной конвекции // Тез. докл. и сообщений XV Международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 23 – 26 мая 2016 г., Минск, 2016 г. – С. 157 – 161.
10. Сухоцкий А. Б., Фарафонов В. Н., Филатов С. О., Сидорик Г. С. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной оребренной трубы при различных углах наклона // Труды БГТУ. Сер. I. Лесн. хоз-во, природопольз. и переработка возобн. рес. – 2017 г. Вып I. - Минск: БГТУ, 2017. – С. 169–175.
11. Сидорик Г. С. Экспериментальная установка для исследования свободноконвективного теплообмена ребристых труб воздухоохлаждаемых теплообменников // ЖУРНАЛ «ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ ЖУРНАЛ» МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА. - Москва: МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА, 2016. – С. 1–7.

12. Самородов А. В. К расчету теплообмена излучением круглорбристых труб и пучков // Тр. лесонинженерного факультета Петрозаводского гос. ун-та. 1999. Вып. 2. С. 135–142.

Авторы публикации

Сухоцкий Альберт Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет. E-mail: alk2905@mail.ru.

Сидорик Галина Сергеевна – аспирант кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com. Тел. +375-29-797-47-00.

References

1. Kuntysch V. B., Bessonnyj A. N. Examples of calculations of non-standardized effective heat exchangers. SPb.: Nedra, 2000. 300 p.
2. Jaluria, Y., 1980. Natural Convection: Heat and Mass Transfer. Oxford: New York: Pergamon Press, p. 326.
3. Gebhart B., 1973. Natural convection flows and stability. Advances in Heat Transfer, Academic Press. N.Y., Vol. 9, p. 273.
4. Kuntysch V. B., Pozdnyakova A. V., Tretjakov P. A. Generalization of experimental data on free convection for three-row corridor bundles from bimetallic ribbed pipes / Proceedings of the Fifth Russian National Heat Transfer Conference. Vol. 8, 2010. P. 92–94.
5. Korolenko Ju. A. Heat transfer from a horizontal bundle of pipes to air under conditions of free convection // Izvestiya of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor of the Polytechnic Institute named after SM. Kirov 1962. № 110. P. 26–33.
6. Samorodov A. V. Improvement of the method of thermal calculation and design of air cooling units with staggered finned beams: Avtoref dis. kand. tehn. nauk 05.14.14. 1999. P. 3–22.
7. Novozhilova A. V. Analysis of methods for determining the heat transfer of air on finned heating surfaces under free convection // Problems of heatpower engineering in the European North: Sat. Sci. Tr. – Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2010. – P. 88–97.
8. Martynenko O. G., Sokovishin Ju. A. Free-convective heat transfer: Handbook. - Mn.: Science and Technology, 1982. – 400 p.
9. Novozhilova A. V. To the calculation of the heat exchange of corridor bundles from bimetallic ribbed pipes at different tube angles in the free convection regime // Abstracts and reports of the XV International Forum on Heat and Mass Transfer, Minsk, May 23 – 26, 2016, Minsk, 2016. – P. 157 – 161.
10. Suhockij A. B., Farafontov V. N., Filatov S. O., Sidorik G. S. Development of the stand and investigation of free convection of a single finned tube at different angles of inclination // Proceedings of BSTU. Ser. I. Forestry, nature management and processing of renewable resources – 2017. Vol. I. – Minsk: BSTU, 2017. P. 169 – 175.
11. Sidorik G. S. Experimental installation for investigating the free convection heat exchange of finned tubes of air-cooled heat exchangers // JOURNAL "POLYTECHNICAL YOUTH MAGAZINE" MSTU IM. N.E. BAUMANA. – Moscow: MSTU IM. N.E. BAUMANA, 2016. – pp. 1–7.
12. Samorodov A. V. To the calculation of heat transfer by radiation of round-rimmed tubes and bundles, Tr. Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University. University. 1999. V. 2. P. 135–142.

Authors of the publication

Sukhotskii Albert Borisovicz – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor in the Department of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Belarusian State Technological University

© А.Б. Сухоцкий, Г.С. Сидорик

E-mail: alk2905@mail.ru. Tel.+375-29-570-81-47.

Sidorik Galina Sergeevna – PhD student in the Department of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com.

Поступила в редакцию

24 мая 2017 г.

УДК 621.311, 621.331

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНЕЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В.П. Закарюкин¹, А.В. Крюков^{1,2}, Е.А. Алексеенко³

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению Трансэнерго,
г. Иркутск, Россия

***Резюме:** В применяемых на практике методах определения аварийных режимов систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока используется эквивалентирование внешней сети реактансами короткого замыкания (КЗ) на вводах тяговых подстанций. Такое эквивалентирование может приводить к появлению погрешностей определения тока КЗ. Причина возникновения погрешностей связана с тем, что предложенные расчетные формулы базируются на методе симметричных составляющих при наличии однократной несимметрии в трехфазной цепи. Короткое замыкание в тяговой сети при двустороннем питании межподстанционной зоны создает двойную несимметрию, поскольку сказывается сразу на двух смежных тяговых подстанциях, и при сильной связи между ними по внешней сети возникает взаимовлияние несимметрий друг на друга.*

Для определения границ применимости упрощенного эквивалентирования авторами предприняты сопоставительные расчеты аварийных режимов с помощью моделей, построенных в фазных координатах, и с применением эквивалентных реактансов внешнего электроснабжения.

Определение токов КЗ в системе тягового электроснабжения 27,5 кВ сравнительно простой конфигурации проведено в трех вариантах: по формулам «Руководящих указаний по релейной защите систем тягового электроснабжения», по полнофункциональной расчетной схеме комплекса Fazopord, учитывающей емкостные и индуктивные взаимовлияния проводов, а также по уточненной аналитической формуле. Полученные результаты показывают сравнительно небольшие погрешности при мощности КЗ, превышающей 1000 МВ·А. При меньших значениях мощности КЗ погрешность может достигать нескольких десятков процентов и становится недопустимой.

***Ключевые слова:** железная дорога, система тягового электроснабжения, короткое замыкание, моделирование, расчет токов.*

ANALYSIS OF APPLICABILITY OF EXTERNAL NETWORK SIMPLIFIED MODELS FOR DEFINITION OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN SYSTEMS OF RAILROAD TRACTION POWER SUPPLY

V.P. Zakaryukin¹, A.V. Kryukov^{1,2}, E.A. Alekseenko³

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³Irkutsk distance of Power Supply, structural division of Trans Power, Russian Railway,
Russia

Abstract: *In practical methods of emergency operation in systems of tractive electric power supply systems the equivalent models of external network constructed on the basis of tractive substations short circuit (SC) reactances are used. Such modeling can give errors of definitions of SC mode parameters. The origin of errors consists of the fact that the offered estimated formulas are based on method of symmetric components with one asymmetry in three-phase circuit. Tractive network short circuit in case of double-sided supply of inter substation zone creates double asymmetry as it affects directly on two adjacent tractive substations, and in case of external network close coupling there is an interference of asymmetries at each other.*

For delimitation of simplified equivalent models applicability authors made comparative calculations of emergency operation by means of models constructed in phase coordinates and using external electric power supply equivalent reactances.

Determination of SC currents in system of 27,5 kV tractive electric power supply of rather simple configuration is carried out in three options: on formulas of "Guide-line on relay protection of tractive electric supply ", on full-function estimated scheme of Fazonord complex considering wires capacity and inductive interferences and on specified analytical formula. The received results show rather small errors at SC power exceeding 1000 MV·A. At small values of SC power error can reach several tens percent and becomes inadmissible.

Keywords: *railroad, tractive electric power supply system, short-circuit, modeling, current calculation.*

Введение

Настройка систем релейной защиты требует расчетного определения токов и сопротивлений короткого замыкания (КЗ). Для решения задач определения аварийных режимов в системах тягового электроснабжения (СТЭ) [1–3] предложен ряд эффективных методов и алгоритмов [4–10]. В работах [4–6] используется лучевая схема замещения тягового трансформатора и эквивалент внешней сети, в книге [7] и в «Руководящих указаниях...»¹ внешняя сеть представлена реактансом, в работах [8–10] рассматриваются параметры многопроводной тяговой сети для определения сопротивлений петли короткого замыкания. Значительная часть работ по определению токов КЗ в СТЭ основана на применении метода симметричных составляющих или его модификаций, использующих другие диагонализующие преобразования матриц сопротивлений и проводимостей. В применяемых на практике методах выполняется эквивалентирование внешней сети реактансами короткого замыкания на вводах тяговых подстанций. Такое эквивалентирование может приводить к появлению погрешностей расчета параметров режима КЗ. Для определения границ применимости подобного эквивалентирования авторами предприняты сопоставительные расчеты аварийных режимов с помощью моделей, построенных в фазных координатах, и с применением эквивалентных реактансов внешнего электроснабжения.

Постановка задачи

Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения предписывают при расчетах токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети электрифицированной железной дороги переменного тока 27,5 кВ пользоваться эквивалентным реактансом внешнего электроснабжения, заданным в форме мощности короткого замыкания на вводах в подстанцию. Формула для определения тока КЗ, используемая в «Руководящих указаниях...», при приведении параметров к стороне тягового напряжения без учета допусков по напряжению КЗ трансформатора может быть представлена так:

¹ Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: Трансиздат, 2005. 216 с.

$$i_K = \frac{U_{nom}}{2(\underline{Z}_L + \underline{Z}_T) + \underline{Z}_0 l_k}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_L = \frac{jU_{nom}^2}{S_k}$ – эквивалентный реактанс системы внешнего электроснабжения; $U_{nom} = 27500$ В; S_k – мощность трехфазного КЗ на вводах подстанции; $\underline{Z}_T = \frac{j u_k U_{nom}^2}{100 S_n}$ – эквивалентный реактанс трансформатора; u_k – напряжение КЗ трансформатора в процентах, S_n – номинальная мощность трансформатора; $\underline{Z}_0 = (R_0 + jX_0)$ – сопротивление 1 км тяговой сети; l_k – расстояние от тяговой подстанции (ТП) до места КЗ.

Этот подход в некоторых случаях может приводить к погрешностям определения токов фидеров контактной сети, поскольку формула (1) базируется на методе симметричных составляющих при наличии однократной несимметрии в трехфазной цепи. Короткое замыкание в тяговой сети при двустороннем питании межподстанционной зоны создает двойную несимметрию, поскольку сказывается сразу на двух смежных ТП, и при сильной связи между подстанциями по внешней сети возникает взаимовлияние несимметрий друг на друга. Погрешности расчетов токов в значительной степени зависят от мощности КЗ на вводах в подстанцию. При больших величинах S_k эквивалентный реактанс внешней сети мал и ток короткого замыкания определяется в основном сопротивлениями трансформатора и тяговой сети. Поэтому становится актуальной задача определения мощности КЗ, при которой формула (1) обеспечивает приемлемую погрешность расчета, к примеру, порядка 10%.

Кроме значения S_k погрешности расчетов тока по формуле (1) зависят от жесткости связи смежных тяговых подстанций по внешнему электроснабжению и, следовательно, от схемы их питания [1]. Напряжение питания тяговых подстанций также играет немаловажную роль. Сети напряжением 220 кВ, как правило, характеризуются более высокими мощностями коротких замыканий по сравнению с сетями 110 кВ, и погрешности расчетов токов КЗ для сети 220 кВ должны быть меньше.

Оценить погрешности расчетных формул для тока короткого замыкания в тяговой сети можно путем определения режимов КЗ с помощью программного комплекса *Fazonord* [11–13]. Этот комплекс позволяет проводить расчеты режимов с учетом емкостных и взаимоиндуктивных связей проводов в многопроводных системах, а также корректно моделировать схемы соединений обмоток и конфигурацию магнитной системы силовых трансформаторов. С его помощью можно рассчитать токи трехфазных коротких замыканий на вводах подстанций и эквивалентировать внешнее электроснабжение реактансами КЗ, тем самым реализовав подход, заложенный в формулах (1).

Методика моделирования

Формула (1) предполагает симметричную систему питающих напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, приложенную за эквивалентным симметричным реактансом (рис. 1). При коротком замыкании в тяговой сети вблизи подстанции ТП1 возникает следующая ситуация:

- по фидеру контактной сети (КС) подстанции ТП1 протекает большой ток, порядка 4...6 кА; ток фидера КС ТП2 в 4 ... 5 раз меньше;
- основной вклад в несимметрию питающих напряжений подстанций ТП1 и ТП2 вносит большой ток фидера КС подстанции ТП1;
- подстанция ТП2 получает питание от существенно несимметричной системы напряжений узлов 4, 5, 6, поэтому формула (1) для расчета тока КЗ фидера контактной сети (ФКС) ТП2 не применима;
- ввиду сравнительно небольшого токопотребления трансформатором ТП2 можно полагать его малый вклад в несимметрию напряжений.

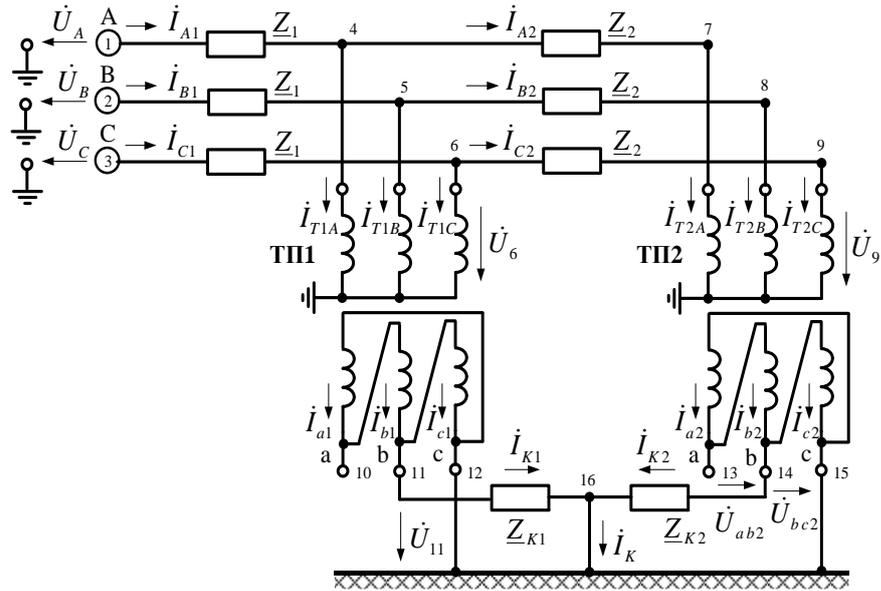


Рис. 1. Схема замещения системы электроснабжения тупиковой подстанции

Использование симметричных составляющих для трансформатора ТП2 затруднено, поскольку для него имеют место две несимметрии: двухфазное короткое замыкание на вторичной обмотке и несимметричное питающее напряжение. Выходом может быть применение фазных координат с упрощающими положениями, заключающимися в использовании модели трансформатора со взаимноиндуктивными связями фаз обмоток по рис. 2 и малым влиянием трансформатора ТП2 на несимметрию напряжений питающей сети.

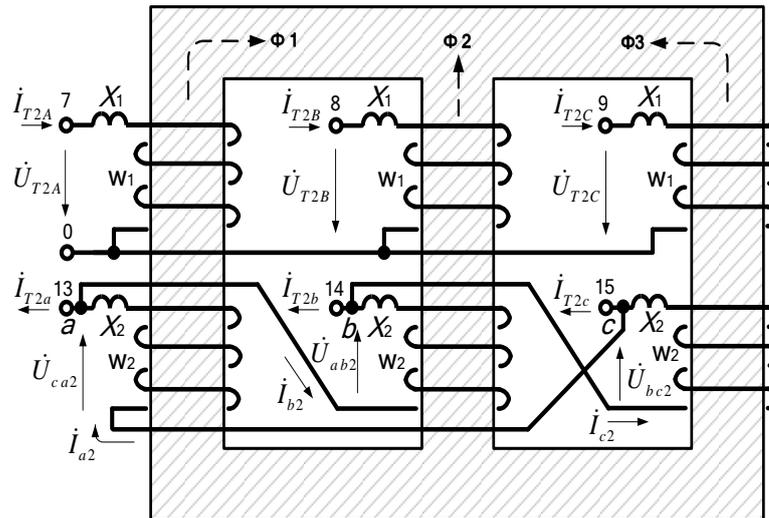


Рис. 2. Схема токов и магнитных потоков трансформатора Y/D

В предположении симметрии сердечника взаимные индуктивности M между фазами первичной обмотки равны друг другу, $M_{AB} = M_{BC} = M_{CA} = M$, равны и собственные индуктивности фаз $L_A = L_B = L_C = L_1$, причем $L_1 = 2M$, поскольку магнитный поток,

созданный катушкой фазы, замыкается через два одинаковых соседних стержня магнитопровода (рис. 2). Величину M можно определить через параметры холостого хода трансформатора, который предполагает симметричный режим и номинальные напряжения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1n} &= U_{1n} = 2jX_M \dot{I}_A - jX_M \dot{I}_B - jX_M \dot{I}_C; \\ U_{1n} \underline{a}^2 &= -jX_M \dot{I}_A + 2jX_M \dot{I}_B - jX_M \dot{I}_C; \\ U_{1n} \underline{a} &= -jX_M \dot{I}_A - jX_M \dot{I}_B + 2jX_M \dot{I}_C,\end{aligned}$$

где U_{1n} – номинальное фазное напряжение первичной обмотки; $\underline{a} = e^{j120^\circ}$ – фазный множитель; \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C – токи фаз первичной обмотки; $X_M = \omega M$; $X_\mu = 2X_M$ – индуктивное сопротивление намагничивания. Реактансами короткого замыкания трансформатора в этом случае можно пренебречь.

Поскольку $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, то $\dot{I}_A = \frac{U_{1n}}{3jX_M}$. Ток холостого хода равен $I_A = \frac{S_n}{3U_{1n}} \frac{i_x}{100}$, где i_x – ток холостого хода в процентах; U_{1n} – номинальное фазное напряжение первичной обмотки; $X_M = \frac{100U_{1n}^2}{i_x S_n}$. Для трансформатора ТДТНЖ-40000/115/27.5 $X_M = 12200$ Ом.

Потокосцепления катушек пропорциональны числам их витков, поэтому взаимоиנדуктивные сопротивления первичной и вторичной катушек разных фаз равны $X_{12} = X_M / k_T$; $k_T = U_{1n} / U_{2n}$ – фазный коэффициент трансформации. Для катушек одной фазы взаимоиנדуктивные сопротивления равны $X_{11} = 2X_M / k_T = 2X_{12}$. Взаимные индуктивности между фазами вторичной обмотки определяются соотношением $X_m = X_M / k_T^2$. Индуктивное сопротивление намагничивания фазы вторичной обмотки равно $X_{\mu 2} = \frac{2X_M}{k_T^2} = 2X_m$.

Система уравнений, описывающая состояние трансформатора ТП2, может быть записана так:

$$\begin{aligned}-j\dot{U}_{T2A} &= (X_\mu + X_1)\dot{I}_{T2A} - X_M \dot{I}_{T2B} - X_M \dot{I}_{T2C} - X_{11}\dot{I}_{a2} + X_{12}\dot{I}_{b2} + X_{12}\dot{I}_{c2}; \\ -j\dot{U}_{T2B} &= -X_M \dot{I}_{T2A} + (X_\mu + X_1)\dot{I}_{T2B} - X_M \dot{I}_{T2C} + X_{12}\dot{I}_{a2} - X_{11}\dot{I}_{b2} + X_{12}\dot{I}_{c2}; \\ -j\dot{U}_{T2C} &= -X_M \dot{I}_{T2A} - X_M \dot{I}_{T2B} + (X_\mu + X_1)\dot{I}_{T2C} + X_{12}\dot{I}_{a2} + X_{12}\dot{I}_{b2} - X_{11}\dot{I}_{c2}; \\ -j\dot{U}_{ca2} &= (X_{\mu 2} + X_2)\dot{I}_{a2} - X_m \dot{I}_{b2} - X_m \dot{I}_{c2} - X_{11}\dot{I}_{T2A} + X_{12}\dot{I}_{T2B} + X_{12}\dot{I}_{T2C}; \\ -j\dot{U}_{ab2} &= -X_m \dot{I}_{a2} + (X_{\mu 2} + X_2)\dot{I}_{b2} - X_m \dot{I}_{c2} + X_{12}\dot{I}_{T2A} - X_{11}\dot{I}_{T2B} + X_{12}\dot{I}_{T2C}; \\ -j\dot{U}_{bc2} &= -X_m \dot{I}_{a2} - X_m \dot{I}_{b2} + (X_{\mu 2} + X_2)\dot{I}_{c2} + X_{12}\dot{I}_{T2A} + X_{12}\dot{I}_{T2B} - X_{11}\dot{I}_{T2C}.\end{aligned}$$

Решение системы уравнений при условиях, отвечающих рис. 1:

$$\begin{aligned}I_{b2} &= \dot{I}_{a2}; \quad \dot{I}_{K2} = \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2}; \quad \dot{I}_{c2} = \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{K2}; \\ \dot{U}_{bc2} &= \underline{Z}_{K2} \dot{I}_{K2}; \quad \dot{U}_{ab2} + \dot{U}_{bc2} + \dot{U}_{ca2} = 0; \quad \dot{U}_{ca2} = -\dot{U}_{ab2} - \underline{Z}_{K2} \dot{I}_{K2}; \\ \dot{U}_{T2A} &= \dot{U}_{T1A} - \underline{Z}_2 \dot{I}_{T2A}; \quad \dot{U}_{T2B} = \dot{U}_{T1B} - \underline{Z}_2 \dot{I}_{T2B}; \quad \dot{U}_{T2C} = \dot{U}_{T1C} - \underline{Z}_2 \dot{I}_{T2C},\end{aligned}$$

приводит к следующему выражению для тока КЗ:

$$\dot{I}_{K2} = \frac{3j\dot{U}_{T1C} X_{12}}{\left(2X_m + \frac{2X_2}{3} - j\underline{Z}_{K2}\right)(3X_M + X_1 - j\underline{Z}_2) - 6X_{12}^2}. \quad (2)$$

Приведенные выражения позволяют получить приближенные оценки погрешностей вычисления тока КЗ фидера КС подстанции ТП2 при коротком замыкании в тяговой сети вблизи подстанции ТП1 по следующему алгоритму.

1. Определяются сопротивления \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 при номинальном первичном фазном напряжении U_{1n} :

$$\underline{Z}_1 = \frac{3jU_{1n}^2}{S_{k1}}; \underline{Z}_2 = \frac{3jU_{1n}^2}{S_{k2}} - \underline{Z}_1.$$

2. Вычисляются параметры трансформатора:

$$X_M = \frac{100U_{1n}^2}{i_x S_n}; k_T = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}; X_{12} = \frac{X_M}{k_T}; X_m = \frac{X_M}{k_T^2}; X_1 = \frac{u_k U_{1n}^2}{200 S_n}; X_2 = \frac{u_k U_{2n}^2}{200 S_n}.$$

3. По формуле (1) определяется ток КЗ в тяговой сети \dot{I}_{K1} вблизи трансформатора ТП1 при напряжении $\dot{U}_{nom} = 27500e^{-j60^\circ}$ В.

4. В соответствии с методикой [1] рассчитываются токи фаз тяговой обмотки ТП1:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{K1} / 3; \dot{I}_{b1} = \dot{I}_{a1}; \dot{I}_{c1} = -2\dot{I}_{K1} / 3.$$

5. При отсутствии токов нулевой последовательности первичные токи трансформатора ТП1 равны:

$$\dot{I}_{T1A} = \dot{I}_{a1} / k_T; \dot{I}_{T1B} = \dot{I}_{b1} / k_T; \dot{I}_{T1C} = \dot{I}_{c1} / k_T.$$

6. Без учета токов трансформатора ТП2 приближенно вычисляются фазные напряжения первичной стороны:

$$\dot{U}_{T1A} = \dot{U}_A - \underline{Z}_1 \dot{I}_{T1A}; \dot{U}_{T1B} = \dot{U}_B - \underline{Z}_1 \dot{I}_{T1B}; \dot{U}_{T1C} = \dot{U}_C - \underline{Z}_1 \dot{I}_{T1C};$$

$$\dot{U}_A = U_n; \dot{U}_B = U_n \underline{a}^2; \dot{U}_C = U_n \underline{a}; \underline{a} = e^{j120^\circ}.$$

1. По формуле «Руководящих указаний...» вычисляется ток КЗ и погрешность:

$$I_{K2}' = \frac{U_{nom}}{\sqrt{\left[2U_{nom}^2 \left(\frac{1}{S_{k2}} + \frac{u_{k2}}{100 S_n} \right) + X_0 I_{k2} \right]^2 + (R_0 I_{k2})^2}}; \quad (3)$$

$$\delta_I = \frac{I_{K2}' - I_{K2}}{I_{K2}} \cdot 100\%.$$

Результаты моделирования

Расчеты и моделирование проведены для схемы СТЭ (рис. 1) с использованием следующих параметров: оба трансформатора ТДТНЖ-40000/115/27,5, $u_k = 11\%$, $i_x = 0,9\%$; мощности короткого замыкания на вводах подстанций $S_{k1} = 578$ МВ·А, $S_{k2} = 289$ МВ·А, с варьированием величин; $U_n = 66,4$ кВ; сопротивления тяговой сети однопутного участка $\underline{Z}_{K1} = 0$; $\underline{Z}_{K2} = 10 + j23$ Ом/км. Для сопоставления сформирована схема расчетной модели программного комплекса *Fazonord* (рис. 3) с тяговой сетью однопутного участка с проводами ПБСМ-95+МФ-100 и рельсами Р65.

Результаты расчетов и моделирования сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 4 и 5.

Приведенные зависимости показывают, что расчеты по формуле (2) и с помощью комплекса *Fazonord* близки друг к другу, в то время как формула «Руководящих указаний...» приводит к большим погрешностям при мощности КЗ подстанции ТП1 менее 1000 МВ·А.

Таблица 1

Токи короткого замыкания ФКС ТП-2 при КЗ в тяговой сети вблизи ТП-1					
S_{k1} , МВ·А	S_{k2} , МВ·А	Ток КЗ, А, <i>Fazonord</i>	Ток КЗ, А, по формуле (2)	Ток КЗ, А, по формуле (3)	Различие между столбцами 3 и 4, %
1	2	3	4	5	6
385	193	450	471	756	68,0
578	289	563	586	811	44,0
867	433	670	692	853	27,3
1156	578	737	758	876	18,9

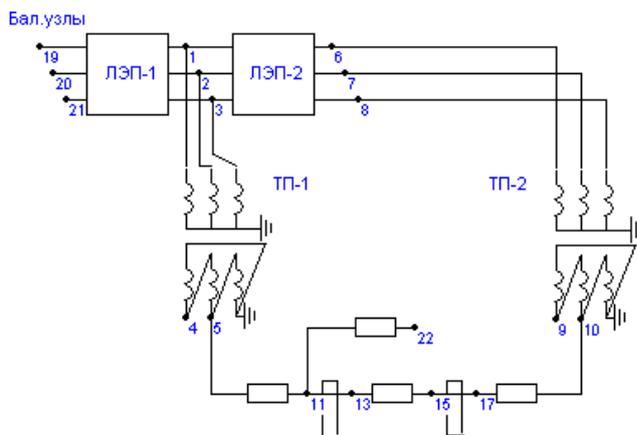


Рис. 3. Схема расчетной модели

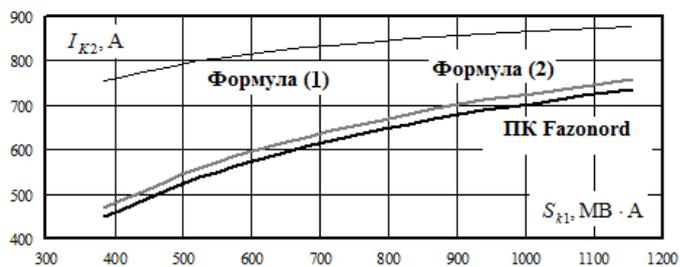


Рис. 4. Зависимость результатов расчета тока КЗ от S_{k1}

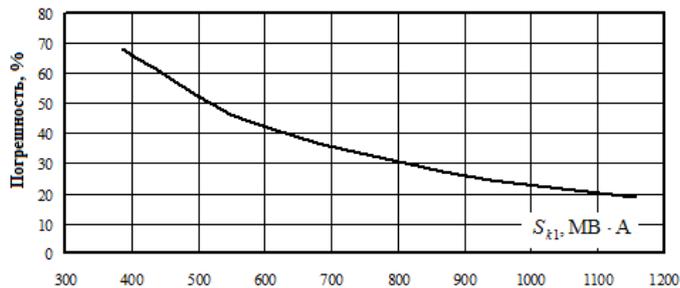


Рис. 5. Зависимость погрешности определения тока КЗ от S_{k1}

Заключение

1. Определение токов КЗ в системе тягового электроснабжения 27,5 кВ сравнительно простой конфигурации по упрощенной формуле «Руководящих указаний по релейной защите

систем тягового электроснабжения» и по полнофункциональной расчетной схеме комплекса *Fazonord*, учитывающей емкостные и индуктивные взаимовлияния проводов, а также по уточненной аналитической формуле показывают сравнительно небольшие различия при мощности КЗ, превышающей 1000 МВ·А.

2. При значениях мощности короткого замыкания головной подстанции менее 500 МВ·А величины тока, полученные по упрощенной формуле, могут превышать истинное значение почти двукратно.

Литература

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industieverlag, 2008. 334 p.
3. Energieversorgung elektrischer bannen / Н. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
4. Герман Л.А., Шаров А.В. Расчет токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока железных дорог // Электричество. 2003. № 3. С. 27–34.
5. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: Московский государственный университет путей сообщения, 2014. 173 с.
6. Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 5–10.
7. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М.: Маршрут, 2006. 272 с.
8. Быкадоров А.Л., Муратова-Милехина А.С. Метод определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // Транспорт-2013. Ростов-на-Дону, 2013. С. 138–139.
9. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчета параметров петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, И.В. Гаврилов и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. № 4. С. 7–12.
10. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление петли короткого замыкания // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 5(41). С. 5–11.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Мультифункциональный подход к моделированию электроэнергетических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4(40). С. 100–107.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. P. 44–48.

Авторы публикации

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения. E-mail: zakar49@mail.ru.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заслуженный энергетик РБ, академик Российской академии транспорта, чл.-кор. Российской инженерной академии, член-кор. Академии наук высшей школы РФ. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Алексеенко Евгения Алексеевна – магистр техники и технологии, энергодиспетчер Иркутской дистанции электроснабжения Восточно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго ОАО РЖД. E-mail: alev_ia@mail.ru.

References

1. Markvardt K.G. Electric energy supplying of railroad. Moscow: Transport, 1982. 528 p.
2. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
3. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
4. German L.A., Sharov A.V. Calculation of current distribution at short circuits in traction networks // Electricity. 1979. No. 3. P. 30–34.
5. German L.A., German V.L. Automatization of alternating current traction energy supply. M.: Moscow State Transport University, 2014. 173 p.
6. German L.A., Kishkurno K.V., Subkhanverdiyev K.S. Assessment of calculation error of short-circuit currents in tractive alternating current net // Electronics and transport electric equipment. 2017. No. 1. P. 5–10.
7. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E. Relay protection of tractive electric power supply networks of alternating current. M.: Route, 2006. 272 p.
8. Bykadorov A.L., Muratova-Milekhina A.S. Determination method of short circuit place in tractive alternating current nets on information technologies basis // Transport-2013. Rostov-on-Don, 2013. P. 138–139.
9. Detailing of tractive alternating current net structure in tasks of simulation and calculation of short circuit loop parameters / A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya, I.V. Gavrilov, etc // Electronics and electric equipment of transport. 2015. No. 4. P. 7–12.
10. Bykadorov A.L., Zarutskaya T.A., Muratova-Milekhina A.S. The analysis of mutual influence of tractive alternating current net parameters on total short circuit loop resistance // The Messenger of Volga region transport. 2013. No. 5(41). P. 5–11.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional approach to electrical power systems simulation // Modern technologies. Systems analysis. Simulation. 2013. No. 4(40). P. 100–107.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. P. 44–48.

Authors of publication

Zakaryukin Vasily Panteleymonovich – Dr. Sci. (Engineering), professor of transport power industry department of Irkutsk state transport university, E-mail: zakar49@mail.ru.

Kryukov Andrey Vasilyevich – Dr. Sci. (Engineering), professor of transport power industry department of Irkutsk state transport university, professor of department of power supply and electrical equipment of the Irkutsk national research technical university, the honored power engineering specialist of Republics of Buryatia, academician of Russian transport academy, member correspondent of Russian engineering academy, member correspondent of Russian academy of Sciences of higher school. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Alekseenko Evgenia Alekseevna – master of equipment and technology, power supply dispatcher of Irkutsk distance of power supply of East Siberian directorate – structural division of Transpower JSC Russian Railway. E-mail: alev_ia@mail.ru.

УДК 621.316.925.2

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН 110–220 кВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ДВОЙНОЙ ЗАПИСИ

А.Л. Куликов¹, В.Ю. Вуколов¹, А.А. Колесников², М.В. Шарыгин¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева
г. Нижний Новгород, Россия

² Филиал Институт «Энергосетьпроект-НН-СЭЩ»
ЗАО "ГК "Электроцит"-ТМ Самара", г. Нижний Новгород, Россия
inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru, sharygin.m.v@gmail.com

Резюме: Для повышения эффективности защиты шин 110–220 кВ предлагается применение алгоритмов, основанных на дифференциальном принципе в сочетании с методом двойной записи. Двойная запись – способ регистрации хозяйственных операций бухгалтерского учета, при котором каждое изменение состояния средств фиксируется на двух счетах, обеспечивая общий баланс. С помощью организации избыточной обработки информации о токах, измеренных на концах защищаемых объектов и сформированных в специальные матрицы, реализуется надежное функционирование дифференциальной защиты, исключая ее излишние действия при повреждениях трансформаторов тока.

Ключевые слова: двойная запись, дифференциальная защита, зона защиты, контроль исправности трансформаторов тока, матрица, теория графов.

DIFFERENTIAL PROTECTION OF BUSBAR 110-220 kV WITH APPLICATION OF METHOD OF DOUBLE ENTRY

A.L. Kulikov¹, V.Yu Vukolov¹, A.A Kolesnikov², M.V Sharyigin¹

¹Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev (NNSTU),
Nizhny Novgorod, Russia

²Branch office “Energosetproekt-NN-SESH”», CJSC “Group Of Companies
“Electroshield – TM Samara”, Nizhny Novgorod, Russia
inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru, sharygin.m.v@gmail.com

Abstract: For increase of efficiency protection of busbar 110-220 kV is proposed to use an algorithms, based on the differential principle, in combination with the method of double entry. Double entry it is method of registration of economic operations accounting, by which every change of the state funds recorded in two accounts, ensuring the overall balance. By providing redundant processing of information about currents measured at the ends of the protected object, and is formed in a special matrix that implements the reliable operation of the differential protection, eliminating its excessive action when damaged the current transformers.

Keywords: double entry, differential protection, protection zone, monitoring health of current transformers, matrix, graph theory.

Введение

Основными видами повреждения систем шин напряжением 110–220 кВ являются двух

и трехфазные короткие замыкания (КЗ), КЗ на землю одной, двух и трех фаз [1].

Для защиты шин 110–220 кВ от междуфазных КЗ, согласно нормативной документации (Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2007), (Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ СТО 56947007-29.240.10.028-2009. ОАО «ФСК ЕЭС» – 2009), применяется дифференциальная токовая защита. Принцип действия современной дифференциальной защиты шин (ДЗШ) изложен в литературе [1, 2].

При работе ДЗШ в случае обрыва или шунтирования фазы вторичной цепи трансформаторов тока (ТТ) одного из присоединений ток поврежденной фазы не поступает в защиту, в результате чего защита может неправильно сработать и отключить всю подстанцию. Следовательно, для правильной работы ДЗШ необходимо предусматривать устройство контроля исправности цепей переменного тока.

В качестве способов для предупреждения неправильной работы ДЗШ при неисправности ТТ применяются: отстройка от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения, контроль дифференциального тока, реагирующий на ток небаланса, учет геометрической суммы токов фаз и нулевого провода ТТ. Данные решения не всегда могут достаточно быстро определить неисправность ТТ, при этом снижают чувствительность и селективность защиты.

Предлагаемая защита шин 110–220 кВ исключает указанные недостатки. Она основана на применении дифференциального принципа в сочетании с методом двойной записи [3, 4]. Для поиска места повреждения защита производит сравнение токов для отдельных участков, получая информацию от ТТ, установленных в различных точках, и выявляет потенциально поврежденный элемент. Далее защита определяет, вызвано ли срабатывание пускового органа коротким замыканием на рассматриваемом участке, либо имеет место неисправность ТТ. Неисправности выявляются с помощью метода двойной записи. Двойная запись – способ регистрации хозяйственных операций бухгалтерского учета, при котором каждое изменение состояния средств фиксируется на двух счетах, обеспечивая общий баланс [5, 6]. С помощью организации избыточной обработки информации о токах, измеренных на концах защищаемых объектов и сформированных в специальные матрицы, реализуется надежное функционирование дифференциальной защиты, исключая ее излишние действия при повреждениях ТТ.

При обнаружении КЗ и отсутствии неисправности происходит отключение поврежденного участка. При обнаружении неисправности ТТ выдается сигнал о ее возникновении.

Реализация защиты

Для описания принципа выполнения защиты рассмотрим распределительное устройство 110 кВ, выполненное по схеме 110–13 «две рабочие системы шин» (Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения. СТО 56947007-29.240.30.010-2008 ОАО «ФСК ЕЭС», 2007). Каждое из присоединений может быть подключено разъединителями как к первой, так и ко второй системе шин. Однолинейная схема с указанием мест установки ТТ, а также токов, протекающих в ветвях с предположительным направлением, показана на рис. 1.

Для схемы (рис. 1) построим однонаправленный граф (рис. 2) с вершинами и дугами [7; 8], где вершинами $V1–V10$ графа представляются шины, точки присоединения, а дугами $e_1–e_{13}$ – ветви трансформаторов тока и выключателей, ветви разъединителей. Дуги, характеризующие ветви трансформаторов тока и выключателей, отображают факты коммутации и имеют вес, представляющий собой информацию о величине протекающего по ветви тока. Дуги, представляющие разъединители, не имеют веса и отображают факты коммутации.

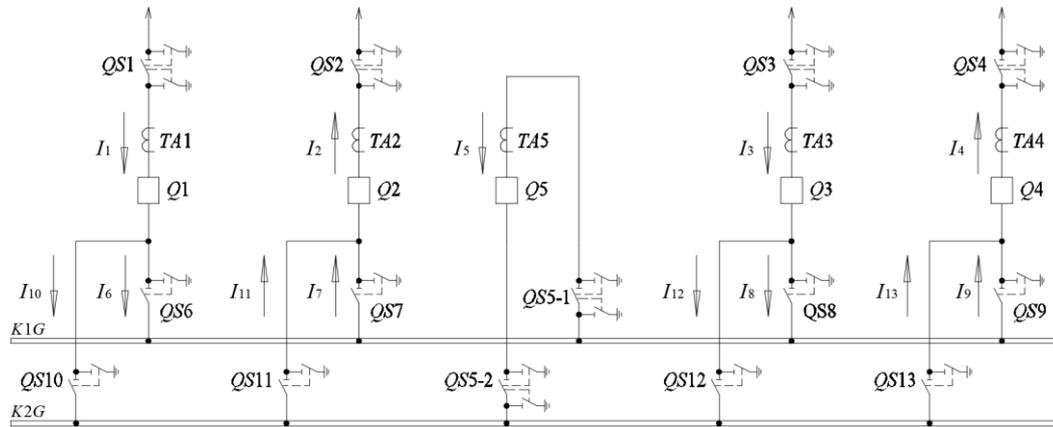


Рис. 1. Схема распределительного устройства 110 кВ.

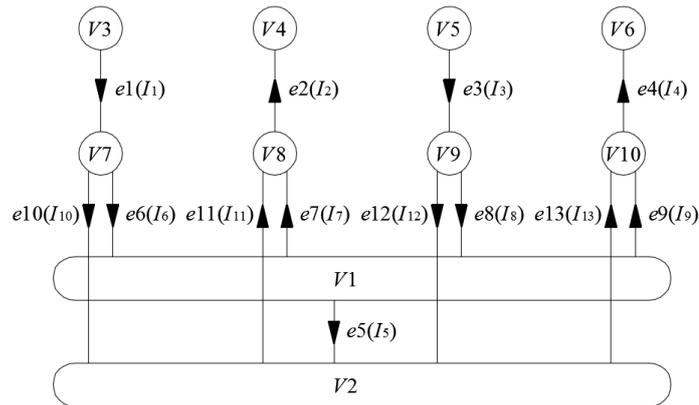


Рис. 2. Однонаправленный граф для распределительного устройства 110 кВ

Зададимся матричным представлением графа [9, 10]. Каждую вершину V_k (где k – номер вершины) графа будем представлять специальной матрицей $MV_k = \|mvk_{i,j}\|$ размером $p \times 2$, где p – число вершин графа. Количество строк матрицы соответствует числу вершин графа, а в столбцы вносится информация о дугах, смежных данной вершине, как направленных к ней, так и исходящих из нее. В первый (левый) столбец вносится информация о весах дуг, направленных к рассматриваемой вершине, а во второй (правый) – направленных от нее.

Элементы матрицы $mvk_{i,j}$, составленной для вершины V_k , определяются следующим образом:

$$mvk_{ij} = \begin{cases} I_q, & \text{если вершины } V_k \text{ и } V_i \text{ смежные и дуга } e_q, \text{ весом } I_q, \\ & \text{направлена от } V_i \text{ к } V_k \text{ для } j = 1 \\ I_q, & \text{если вершины } V_k \text{ и } V_i \text{ смежные и дуга } e_q, \text{ весом } I_q, \\ & \text{направлена от } V_k \text{ к } V_i \text{ для } j = 2 \\ 0, & \text{если вершины } V_k \text{ и } V_i \text{ не смежные.} \end{cases} \quad (1)$$

Для схемы (рис. 1) и соответствующего графа (рис. 2) имеем следующие матрицы токов:

$$\begin{aligned}
 MV1 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_6 & 0 \\ 0 & I_7 \\ I_8 & 0 \\ 0 & I_9 \end{bmatrix} & MV2 = & \begin{bmatrix} I_5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_{10} & 0 \\ 0 & I_{11} \\ I_{12} & 0 \\ 0 & I_{13} \end{bmatrix} & MV3 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV4 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV5 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV6 = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_4 & 0 \end{bmatrix} & MV7 = & \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & I_{10} \\ I_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV8 = & \begin{bmatrix} I_7 & 0 \\ I_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 MV9 = & \begin{bmatrix} 0 & I_8 \\ 0 & I_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & MV10 = & \begin{bmatrix} I_9 & 0 \\ I_{13} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} .
 \end{aligned}$$

Применение двойной записи обеспечивает взаимосвязь между вершинами графа, что позволяет объединить их в единую систему. Каждая дуга графа отражается с одинаковым весом в матрицах токов дважды: как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней, одной матрицы, и как дуга, связанная с вершиной и направленная от нее, другой матрицы. Возможность введения контрольных операций метода двойной записи заключается в том, что, записывая значение каждого веса дуги для разных матриц дважды, можно осуществить проверку правильности данных о токах.

Для проверки правильности данных о токах составим матрицы входящих CI и исходящих CO токов. Матрица CI размерностью $p \times p$, где p – число вершин графа, формируется путем последовательного заполнения по столбцам из левых столбцов матриц токов, а CO – путем последовательного заполнения по столбцам из правых столбцов матриц токов:

$$CI = \sum_{k=1}^p (MVk \times Ak), \quad (2)$$

$$CO = \sum_{k=1}^p (MVk \times Bk), \quad (3)$$

где Ak – матрица размером $2 \times p$, служащая для преобразования матрицы MVk в матрицу

размером $p \times p$, в которой $ak_{i,l} = 1$ при $i = k$, а остальные элементы равны нулю.

Bk – матрица размером $2 \times p$, служащая для преобразования матрицы MV_k в матрицу размером $p \times p$, в которой $bk_{2,j} = 1$ при $j=k$, а остальные элементы равны нулю.

Для рассматриваемого примера матрица входящих токов выглядит следующим образом:

$$CI = \begin{bmatrix} 0 & I_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 & 0 & I_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{11} & 0 & I_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_6 & I_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_8 & I_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а матрица исходящих токов:

$$CO = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 & I_8 & 0 \\ I_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{10} & 0 & I_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_4 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_7 & I_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_9 & I_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выражение для CO можно также получить путем транспонирования CI . Тогда в основе проверки правильности данных о токах будет лежать соблюдение равенства

$$CI^T - CO = 0, \tag{4}$$

где 0 - нулевая матрица, размером $p \times p$.

Следующим этапом является определение зоны действия защиты, исходя из топологии схемы с учетом положения разъединителей.

Зададим для рассматриваемого распределительного устройства (рис. 1) следующие положения разъединителей:

- $QS1, QS2, QS3, QS4, QS5-1, QS5-2, QS6, QS7, QS12, QS13$ – включены;
- $QS8, QS9, QS10, QS11$ – отключены.

Отключенное положение разъединителя, с точки зрения теории графов, характеризуется удалением соответствующей дуги. Для рассматриваемой схемы удаляются дуги $e10, e11, e8, e9$.

Включенное положение разъединителя, с точки зрения теории графов, характеризуется объединением вершин, инцидентных дуге, соответствующей разъединителю, выполняемым путем удаления соответствующей дуги и формирования единой вершины.

В результате возможен переход к новой форме графа (рис. 3) путем исключения дуг $e6-e13$ и объединения вершин $V1, V7, V8$ ($V1^*$) и $V2, V9, V10$ ($V2^*$).

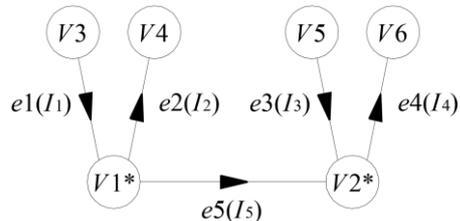


Рис. 3. Итоговый граф

С точки зрения матричных операций, при положении разъединителя «отключено», в матрице MV_k , имеющей в своем составе соответствующую дугу, присваивается значение равное «0» на соответствующей позиции. При положении разъединителя «включено» матрицы, имеющие в своем составе данную дугу, суммируются, а дуге присваивается значение равное «0» на соответствующей позиции.

Таким образом, получаем:

$$I_6 = I_7 = I_8 = I_9 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{13} = 0, \quad (5)$$

$$MV1^* = MV1 + MV7 + MV8, \quad (6)$$

$$MV2^* = MV2 + MV9 + MV10, \quad (7)$$

Матрицы $MV1^*$ и $MV2^*$ отражают зоны релейной защиты. Для рассматриваемого распределительного устройства и соответствующего графа (рис. 3) с принятыми положениями разъединителей, матрицы токов принимают вид:

$$\begin{array}{l}
 MV1^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad
 MV2^* = \begin{bmatrix} I_5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_3 & 0 \\ 0 & I_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad
 MV3 = \begin{bmatrix} 0 & I_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \\
 MV4 = \begin{bmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad
 MV5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad
 MV6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_4 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} .
 \end{array}$$

Определение поврежденной системы шин реализуется следующим образом.

Защитой производится сравнение токов по дифференциальному принципу для каждой зоны защиты. Защищаемые элементы представляются вершинами графа и описываются матрицами токов MV_k . В соответствии с дифференциальным принципом при отсутствии повреждения сумма токов, входящих и исходящих из узла, равна нулю. Сумма токов, не равная нулю, свидетельствует о наличии КЗ. Утверждение справедливо для всех вершин графа со степенью > 1 , представляющих зоны защиты. Применительно к рассматриваемой схеме такими вершинами являются $V1^*$ и $V2^*$.

Для проверки наличия тока короткого замыкания для всех вершин графа, представляющих шины распределительного устройства, составляются уравнения для суммы токов SMV_k в узле (вершине) V_k :

$$SMV_k = C \times MV_k \times D = 0, \quad (8)$$

где $C = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ – матрица-вектор размером $1 \times p$, служащая для суммирования токов в различных узлах;

$D = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ – матрица - вектор размером 2×1 , служащая для итогового суммирования в узле.

В развернутой форме выражение (8) принимает вид:

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \times MVk \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = 0. \quad (9)$$

Например, для вершины $V1^*$ графа (рис. 3) сумма токов в узле составляет:

$$SMV1^* = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_5 \\ I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = I_1 - I_2 - I_5.$$

Условиями наличия КЗ в соответствующей зоне действия защиты будут:

– на первой системе шин, соответствующей вершине графа $V1^*$,

$$SMV1^* = I_1 - I_2 - I_5 \neq 0; \quad (10)$$

– на второй системе шин, соответствующей вершине графа $V2^*$,

$$SMV2^* = I_3 + I_5 - I_4 \neq 0. \quad (11)$$

В качестве критерия проверки исправности трансформаторов тока применяется следующее соображение. Поскольку каждая дуга графа отражается с одинаковым весом (значением тока) в матрицах вершин дважды – как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней одной матрицы, и как дуга, связанная с вершиной и направленная от нее другой матрицы, – то при неисправности сумма входящих и исходящих токов в двух матрицах нарушается, но суммарный дифференциальный ток всей сети остается равным нулю. При наличии КЗ и сохранении суммы токов для всей сети равной нулю определяется неисправность трансформаторов тока.

Запишем данное утверждение в матричной форме для вершин, представляющих собой защищаемые элементы сети.

Составим матрицу – вектор S , размером $n \times 1$, где n – число вершин графа со степенью > 1 . Строки матрицы представляют собой сумму токов в узлах защищаемых элементов сети SMV_k , то есть $s_{i,j} = SMV_k$ при степени вершины $V_k > 1$.

Применительно к рассматриваемой схеме

$$S = \begin{bmatrix} SMV1^* \\ SMV2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 - I_2 - I_5 \\ I_3 + I_5 - I_4 \end{bmatrix}.$$

При неверных показаниях ТТ, вызванных неисправностью ТТ, сумма токов SMV_k становится не равной нулю.

Для получения итогов матрицы SUM необходимо матрицу S умножить слева на единичный вектор-столбец E – матрица-вектор размером $1 \times n$ (где n – число вершин графа, степени > 1), все элементы которого единицы, служащая для суммирования токов в различных узлах:

$$SUM = E \times S. \quad (12)$$

Применительно к рассматриваемой схеме:

$$SUM = E \times S = [1 \ 1] \times \begin{bmatrix} SMV1^* \\ SMV2^* \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$SUM = [1 \ 1] \times \begin{bmatrix} I_1 - I_2 - I_5 \\ I_3 + I_5 - I_4 \end{bmatrix} = I_1 - I_2 - I_5 + I_3 + I_5 - I_4 = I_1 - I_2 + I_3 - I_4.$$

Признаки функционирования дифференциальной защиты шин при различных соотношениях токов и результатах выполнения матричных операций по выражениям (8) и (13) сведены в таблицу 1.

Таблица

Результаты матричных операций и признаки функционирования защиты

Результирующее значение матричной операции			Признаки функционирования дифференциальной защиты
<i>SMV1*</i>	<i>SMV2*</i>	<i>SUM</i>	
0	0	0	Ток КЗ отсутствует, ТТ исправны.
≠0	0	≠0	Ток КЗ на элементе, соответствующем вершине V1* (повреждение на системе шин K1G).
0	≠0	≠0	Ток КЗ на элементе, соответствующем вершине V2* (повреждение на системе шин K2G).
≠0	≠0	≠0	Ток КЗ на элементе, соответствующем дуге e ₅ графа - КЗ на перемычке между системами шин K1G и K2G.
≠0	≠0	0	Неисправен трансформатор тока TA5 (дуга e ₅ графа).
≠0	0	0	Неисправен ТТ, общий для V1* и V3 или V4 (дуга e ₁ или e ₂ графа).
0	≠0	0	Неисправен ТТ, общий для V2* и V5 или V6 (дуга e ₃ или e ₄ графа).

Выявление повреждения трансформатора тока отдельного присоединения можно осуществить путем дополнительной технической диагностики или автоматически путем формирования результирующих токов, характеризующих их исправность. Например, путем введения дополнительных условий к указанным в табл. 1, представленных добавочными матрицами токов.

В частности, для рассматриваемой схемы примем, что фидер выключателя Q2 представляет собой присоединение силового двухобмоточного трансформатора, с ТТ TA7 обмотки низшего напряжения, фиксирующим ток I₁₄. Трансформатор представляется дополнительной матрицей токов MV11. Соответственно, при изменении структуры схемы, изменится размерность матриц с 10x2 на 11x2, а также описание матрицы MV4, степень которой станет равной 2.

Матрицы вершин MV4 и MV11 примут вид:

$$MV4 = \begin{bmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_{14} \end{bmatrix} \quad MV11 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_{14} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица SUM по выражению (14):

$$SUM = [1 \ 1 \ 1] \times \begin{bmatrix} I_1 - I_2 - I_5 \\ I_3 + I_5 - I_4 \\ I_2 - I_{14} \end{bmatrix} = \\ = I_1 - I_2 - I_5 + I_3 + I_5 + I_2 - I_{14} - I_4 = I_1 - I_{14} + I_3 - I_4.$$

Соответственно, при $SMV1^* \neq 0$, $SMV2^* = 0$, $SMV4 \neq 0$, $SUM = 0$ можно говорить о неисправности $TA2$ (дуга e_2 графа), а $SMV1^* \neq 0$, $SMV2^* = 0$, $SMV4 = 0$, $SUM = 0$ свидетельствует о неисправности $TA1$ (дуга e_1 графа).

Таким образом, в зависимости от соотношения токов на схеме распределительного устройства, а также результатов выполнения операций над матрицами можно реализовать надежное функционирование дифференциальной защиты шин 110–220 кВ. При этом обеспечивается не только действие защиты при повреждениях на каждом участке, но и исключаются ее излишние срабатывания при повреждениях трансформаторов тока.

Выводы

Разработаны основные принципы работы дифференциальной защиты шин 110–220 кВ с применением метода двойной записи. Реализация предлагаемого способа позволит повысить надежность и эффективность релейной защиты сетей 110–220 кВ.

Благодаря применению дифференциального принципа и метода двойной записи предлагаемая защита имеет высокую гибкость при изменении конфигурации рассматриваемой сети, а также надежную систему проверки исправности трансформаторов тока.

Разработанный принцип в перспективе может быть также применен для других видов защит, например дифференциальной токовой защиты шин (ошиновок) 330–750 кВ.

Литература

1. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты, принципы и применение. М.: Энергоиздат, 2005. 273 с.
2. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А. Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи // Вестник НГИЭИ. 2017. № 2 (69). С. 71–81.
4. Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Куликов А.Л. Применение метода двойной записи в дифференциальной защите распределительных сетей 6–35 кВ // Материалы двенадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017». ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», Иваново, 2017. Т. 3. С. 113–114.
5. Бачуринская И.Н., Горячих С.П. Элементы метода бухгалтерского учета // Вектор экономики. 2016. № 4.
6. Азиева З.И., Еремина Н.В., Абальмаз В.В., Сюсюра К.С. Возникновение двойной записи в бухгалтерском учете // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 14 (2016). № 2. С. 45–51.
7. Bondy A., Murty U.S.R. Graph Theory. Springer-Verlag London, 2008. Т. 244. (Graduate Texts in Mathematics). DOI:10.1007/978-1-84628-970-5. XII, 655
8. Diestel, R. Graph Theory. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. Т. 173. (Graduate Texts in Mathematics). DOI: 10.1007/978-3-662-53622-3. XVIII, 428 p.
9. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 5-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 560 с.

10. Андерсон Дж. А. Дискретная математика и комбинаторика. М.: Вильямс, 2004. 960 с.

Авторы публикации

Куликов Александр Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: inventor61@mail.ru.

Вуколов Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: vvucolov@mail.ru.

Колесников Антон Александрович – инженер отдела РЗА и вторичной коммутации филиала «Энергосетьпроект - НН - СЭЦ» г. Нижний Новгород, ЗАО «ГК «Электрощит» -- ТМ Самара». E-mail: anton8094@mail.ru.

Шарыгин Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: sharygin.m.v@gmail.com.

References

1. Tsigler G. Tsifrovye ustroystva differentsial'noi zashchity, printsipy i primeneniye. M.: Energoizdat, 2005. 273 p.
2. Shneerson E.M. Tsifrovaya releinaya zashchita. M.: Energoatomizdat, 2007. 549 p
3. Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A. Tsentralizovannaya differentsial'naya zashchita raspredelitel'nykh sel'skikh setei 6–35 kV s primeneniem metoda dvoynoi zapisi // Vestnik NGIEI. 2017. No. 2 (69). P. 71–81.
4. Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A., Kulikov A.L. Primeneniye metoda dvoynoi zapisi v differentsial'noi zashchite raspredelitel'nykh setei 6–35 kV // Materialy dvenadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energiya-2017». FGBOU VPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina», Ivanovo, 2017. Vol. 3. P. 113–114.
5. Bachurinskaya I.N., Goryachikh S.P. Elementy metoda bukhgalterskogo ucheta // Vektor ekonomiki. 2016. No. 4.
6. Azieva Z.I., Eremina N.V., Abal'maz V.V., Syusyura K.S. Vozniknoveniye dvoynoi zapisi v bukhgalterskom uchete // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 14 (2016). No. 2. P. 45–51.
7. Bondy A., Murty U.S.R. Graph Theory. Springer-Verlag London, 2008. Vol. 244. (Graduate Texts in Mathematics). DOI:10.1007/978-1-84628-970-5. XII, 655.
8. Diestel, R. Graph Theory. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. T. 173. (Graduate Texts in Mathematics). DOI: 10.1007/978-3-662-53622-3. XVIII, 428 p.
9. Gantmakher F. R. Teoriya matrits. 5-e izd. M.: FIZMATLIT, 2004. 560 p.
10. Anderson Dzh. A. Diskretnaya matematika i kombinatorika. M.: Vil'yams, 2004. 960 p.

Authors of the publication

Kulikov Alexander Leonidovich – Dr. Sci. (Techn.), Prof. of the chair «Power Engineering, electricity supply and power electronics» Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

Vukolov Vladimir YU'evich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of the chair «Power Engineering, electricity supply and power electronics» Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

© *А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников, М.В. Шарыгин*

Kolesnikov Anton Aleksandrovich – engineer of the dep. «РРА», Branch office «Energosetproekt-NN-SESH», CJSC «Group Of Companies «Electroshield – ТМ Samara».

Sharygin Mikhail Valerievich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of the chair «Power Engineering, electricity supply and power electronics» Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

Поступила в редакцию

16 июня 2017 г.

УДК 621.311.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УРОВНЯ В ЗОНЕ АКТИВНОГО ГОРЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА И БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТЬ 3. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПАУ В ХАРАКТЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОНАХ ФАКЕЛА

М.С. Иваницкий

**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Волжском, Россия**

***Резюме:** В статье представлены результаты численного моделирования влияния характерных температур факела зоны активного горения на содержание (полициклических ароматических углеводородов) ПАУ, представленных бенз(а)пиреном, в уходящих газах пылеугольного котла БКЗ-75-39 ФБ. Выполнено исследование интенсивности воздействия адиабатической температуры на распределение теплообмена в топочном устройстве котлоагрегата. Установлена степень изменения поглощательной способности топочной среды в условиях влияния безразмерной температуры газов на выходе из зоны активного горения. Выполнена оценка концентраций бенз(а)пирена в пределах температурной зоны (менее 1000 К) пылеугольного факела. На основе полученных результатов определена функциональная зависимость содержания бенз(а)пирена в уходящих газах котла БКЗ-75-39 ФБ от безразмерной температуры продуктов сгорания на выходе из топочной камеры.*

***Ключевые слова:** паровые котлы, пылеугольный факел, бенз(а)пирен.*

MODELING THE IMPACT OF TEMPERATURE LEVEL IN THE ZONE OF ACTIVE COMBUSTION IN THE CONTENTS OF NITROGEN OXIDES AND BENZ(A)PYRENE IN THE COMBUSTION PRODUCTS OF BOILER PLANTS HEATING SYSTEMS. PART 3. THE INTENSITY OF THE FORMATION PAHs IN THE TYPICAL TEMPERATURE ZONES OF THE TORCH

M.S. Ivanitskiy

**Volzhsy Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute», Russia**

***Abstract:** The article presents the results of numerical simulation of the influence of the characteristic temperature of the torch zone of active burning on concentrations of PAHs, represented by benz(a)pyrene in flue gases of coal-fired boiler BKZ-75-39 FB. The research of the intensity of effect of adiabatic temperature on the distribution of heat exchange in furnace of boiler device. The degree of change of absorption capacity of the combustion environment in terms of the effects of the dimensionless gas temperature at the exit from the zone of active combustion. Estimated concentrations of benzpyrene within the temperature zone (less than 1000 K) dust-coal torch. Based on the obtained results we determined the functional dependence of the content of benz(a)pyrene in exhaust gases of the boiler BKZ-75-39 FB from the dimensionless temperature of the combustion products at the exit of the combustion chamber.*

***Keywords:** steam boilers, pulverized coal torch, benzpyrene.*

Введение

Горение в топочных устройствах энергетических котлов угольного топлива сопровождается образованием в продуктах сгорания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Современные аналитические методы индикации позволяют идентифицировать в уходящих газах более 27 представителей ПАУ. Необходимо отметить, что наибольшее негативное воздействие на окружающую среду из представленных соединений оказывает бенз(а)пирен (БП). На интенсивность генерации БП в дымовых газах значительное воздействие оказывают условия сжигания топлива, среди которых определяющим является температурный уровень в зоне активного горения (ЗАГ) топочной камеры котла. Отметим, что температура в ЗАГ определяется, в том числе, внутритопочными мероприятиями, реализуемыми в процессе эксплуатации котлов теплогенерирующих систем электроэнергетического комплекса. Режимные мероприятия, основанные на рециркуляции продуктов сгорания, ступенчатом сжигании топлива, подводе вторичного воздуха в топку применяют на действующих тепловых электростанциях для улучшения экологических показателей работы энергоблоков (повышение интенсивности выгорания продуктов химического недожога – монооксида углерода, ПАУ) и регулирования параметров перегретого пара на выходе из котлоагрегата [1–3].

Целью данной работы является исследование влияния характерных температур зоны активного горения на интенсивность образования ПАУ, представленных бенз(а)пиреном, в пылеугольном факеле котла БКЗ-75-39 ФБ.

Численное моделирование

Температура на выходе из зоны активного горения $T_{\text{заг}}$, К, рассчитывается по выражению [4]

$$T_{\text{заг}} = \frac{T_{\text{ад}}}{1 + M\tilde{V}^{0,3} \left(\frac{1}{\text{Bo}} \right)^{0,6}}, \quad (1)$$

где $\text{Bo} = \frac{\phi B_p (Vc)_Г}{C_0 \psi F \epsilon_m T_{\text{ад}}^3}$ критерий радиационного теплообмена Больцмана.

В частном случае выражение (1) принимает зависимость

$$T_{\text{заг}} = \frac{\beta_{\text{сг}} Q^r}{(Vc)_Г} - \frac{T_{\text{ад}}}{11\text{Bo}^2}, \quad (2)$$

здесь $T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура горения угля, К; $\bar{T}_{\text{заг}}$ – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения (ЗАГ), К; α – коэффициент избытка воздуха; M – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластиванности топочных газов; \tilde{V} – эффективное значение критерия поглощательной способности Бугера; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м²·К⁴); ψF – произведение коэффициента эффективности экранов на суммарную поверхность, ограничивающую ЗАГ, м²; ϵ_m – коэффициент теплового излучения топки в ЗАГ; ϕ – коэффициент сохранения тепла; B_p – расчетный расход топлива, кг/с; $(Vc)_Г$ – суммарная теплоемкость продуктов сгорания, МДж/(кг·°С); $\beta_{\text{сг}}$ – степень сгорания топлива; $\Theta = T_{\text{заг}} / T_{\text{ад}}$ – безразмерная температура уходящих газов на выходе из топки.

Горючие характеристики березовского угля марки Б2, который является основным топливом котла БКЗ-75-39 ФБ, равны соответственно: W=33,0%, A=4,7%, S=0,2%, C=44,2%, H=3,1%, O=14,4%, N=0,4%; $V^{\text{daf}} = 48\%$ – выход летучих компонентов; теплотворная способность топлива 15,66 МДж/кг.

В процессе моделирования рассмотрены различные нагрузки котла с реализацией режимно-технологических мероприятий по ограничению выбросов БП в окружающую среду. Оценка концентраций БП в уходящих газах котлоагрегата с учетом воздействия внутритопочных факторов выполнена на основании рекомендаций РД 153-34. 1-02. 316-2003.

На интенсивность образования и конверсию продуктов недожога значительное влияние оказывают температура факела и концентрация кислорода в топке котла. В качестве основного параметра зонального деления факела принимают его температуру. По длине факел разделяется на пять сечений, каждое из них характеризуется конкретной температурой. Схема зонального разделения факела (L/D_a – относительная длина факела; L – длина факела, м; D_a – диаметр амбразуры горелки, м) показана на рис. 1.

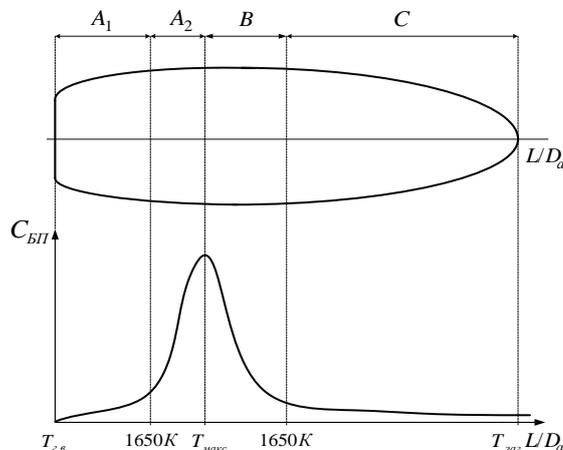


Рис. 1. Температурные зоны пылеугольного факела

В первом сечении температура факела принимается равной температуре горячего воздуха. Второе и четвертое сечения отождествляют нижнюю и верхнюю границы образования значимого количества токсичных соединений. В приведенных сечениях температура составляет 1650 К [5–7].

В зоне A_1 температура изменяется от температуры горячего воздуха $T_{г.в.}$ до 1650 К, происходит деструкция и разложение углеводородов топлива и завершаются процессы смесеобразования, начинается активное выгорание продуктов реакции.

В зоне A_2 происходит выгорание значительной части газообразных и твердых продуктов неполного сгорания. Температура изменяется в пределах от 1650 К до $T_{макс}$, где $T_{макс}$ – максимальная температура горения, К.

В зоне B температура снижается от $T_{макс}$ до 1650 К и наблюдается практическое завершение процессов горения топлива.

В зоне C температура варьируется от 1650 К до $T_{заг}$. Происходит завершение конверсионных процессов основных продуктов горения [5, с. 8].

На рис. 2–4 представлены результаты моделирования режимных характеристик топочного процесса в пылеугольном котле БКЗ-75-39 ФБ.

Обсуждение результатов

На рис. 2 показана зависимость концентрации БП в отходящих газах от безразмерной температуры на выходе из зоны активного горения котлоагрегата БКЗ-75-39 ФБ.

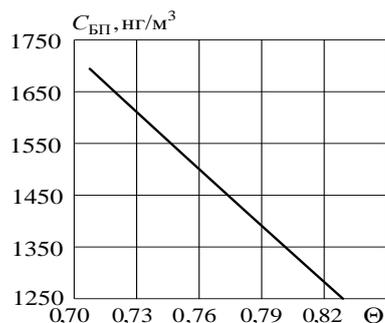


Рис. 2. Изменение концентрации БП в уходящих газах от безразмерной температуры на выходе из зоны активного горения топочной камеры

Обработка полученных результатов позволила аппроксимировать графическую зависимость $C_{БП} = f(\Theta)$ в виде уравнения с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9981$:

$$C_{БП} = 4317 - 3712\Theta, \text{ при } \Theta = 0,708 \div 0,830. \quad (5)$$

Анализ показывает, что в случае увеличения температуры на выходе из ЗАГ на 1% концентрация БП уменьшается в среднем на 30 нг/м^3 . В рассмотренном варианте температура на выходе из ЗАГ составила 1643 К, ее значение получено при параметре, учитывающем влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелочных устройств, $M=0,5$. Рассмотренная область безразмерной температуры Θ , показанная на рис. 2, характеризует зону дожигания продуктов неполного сгорания и завершения конверсионных процессов в топочной камере и предполагает режимно-технологическое воздействие подвода вторичного воздуха для интенсификации окислительных реакций.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 3, характеризуют распределение радиационного теплообмена и показателей поглощательной способности топочной среды для котельной пылеугольной установки БКЗ-75-39 ФБ с учетом вариативных уровней относительного расположения горелок и степени забалластированности топочных газов M .

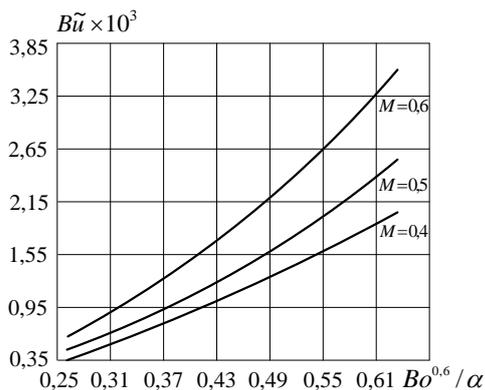


Рис. 3. Влияние критерия радиационного теплообмена на уровень поглощательной способности топочной среды для различных относительных уровней расположения горелок и степени забалластированности топочных газов

Отметим, что уменьшение параметра M учитывает перераспределение радиационного теплообмена и поглощательной способности топочной среды. Приведенные

варианты параметра M указывают на возможность подавления образования ПАУ в зонах пылеугольного факела за счет изменения положения ядра горения, характеризующего максимальную температуру газов в топке.

Графическая зависимость на рис. 4 демонстрирует изменение интенсивности радиационного теплообмена в топке пылеугольного котла от влияния адиабатической температуры горения топлива с учетом пересчета на коэффициент избытка воздуха в горелочном устройстве.

Оценки показывают, что при изменении параметра M от 0,4 до 0,5 поглощательная способность топочной среды увеличивается от $1,83 \cdot 10^{-3}$ до $2,46 \cdot 10^{-3}$, при дальнейшей перестройке факела $B_{\text{в}}$ возрастает на 36,6%. Таким образом, в приведенном случае повышение температуры факела непосредственно улучшает условия выгорания продуктов недожога, включая БП.

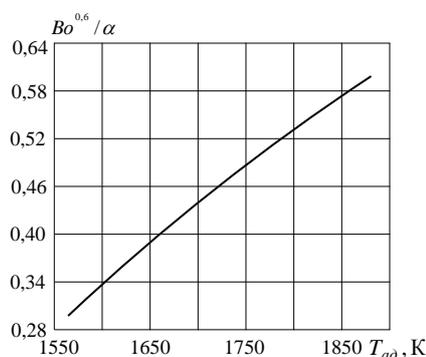


Рис. 4. Изменение интенсивности радиационного теплообмена в топке пылеугольного котла от влияния адиабатической температуры горения топлива

Анализ рис. 4 показывает, что в условиях увеличения адиабатической температуры от 1565 до 1881 К коэффициент, характеризующий интенсивность радиационного теплообмена в топочной камере котла БКЗ-75-39 ФБ, повышается в пределах от 0,190 до 0,457. Отметим, что данные моделирования топочного процесса показывают относительно низкий уровень адиабатической температуры при горении угля. Для обеспечения стабильного воспламенения и фронта горения в этом случае возможно применение внутритопочных мероприятий по подсветке факела мазутом или природным газом, что дополнительно позволит сократить химический недожог топлива, обусловленный наличием в продуктах сгорания монооксида углерода и ПАУ.

Расчетами установлено, что в рассмотренных температурных зонах факела B и C наблюдается конверсия продуктов горения пылевоздушной смеси, в частности ПАУ. В значительной степени окислительные процессы при химическом недожоге зависят от концентрации кислорода O_2 в расчетном сечении. Оценки показывают, что в приведенных условиях колебания O_2 в зоне практического завершения процессов горения, равные 0,8%, способствуют увеличению выхода БП более чем на 5,7%.

Выводы

Расчитаны показатели радиационного теплообмена и поглощательной способности топочной среды в условиях сгорания пылевоздушной смеси с учетом изменения интенсивности воздействия адиабатической температуры в пылеугольном котлоагрегате БКЗ-75-39 ФБ.

Установлена возможность исключения ПАУ в продуктах сгорания топлива посредством реализации в характерных температурных зонах пылеугольного факела внутритопочных мероприятий дожигания продуктов неполного сгорания, основанных на

подводе вторичного воздуха в зону B , характеризующую практическое завершение стадии горения, или в начальную зону C для интенсификации конверсионных процессов.

Результаты позонного расчета факела топочной камеры аппроксимированы математической зависимостью для определения содержания БП от безразмерной температуры на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75-39 ФБ и использования при разработке режимных карт в процессах наладки малотоксичных режимов сжигания березовского угля марки Б2.

Литература

1. Иваницкий М.С. Содержание токсичных продуктов в уходящих газах перспективных угольных энергоблоков 660 и 1060 МВт // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 4. С. 5–9.
2. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн // Вестник МЭИ. 2015. № 2. С. 79–82.
3. Иваницкий М.С. Суммарная агрессивность газовых выбросов пылеугольных котлов, обусловленная компонентами неполного сгорания // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 5 (97). С. 70–75.
4. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург: ЦКТИ, ВТИ, 1998. 257 с.
5. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. Москва, Ленинград: АНССР, ИФХ. 1947. 142 с.
6. Brorstron-Lunden E., Lindsleog A. Degradation of PAH during simulated stack gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // Environmental Science and Technology. 1985. V. 19. № 4. P. 313–316.
7. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. // 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
8. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // Combustion Science and Technology. 1986. V. 50. № 1–3. P. 79–115.
9. Тумановский А.Г., Ольховский Г.Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России // Электрические станции. 2015. № 1. С. 67–73.
10. Сомова Е.В., Шварц А.Л., Вербовецкий Э.Х. Создание пылеугольного энергоблока на ультравискозном параметре пара в рамках европейского проекта AD-700 // Энергетик. 2015. № 2. С. 39–43.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru.

References

1. Ivanickij M.S. Soderzhanie toksichnyh produktov v uhodjashhih gazah perspektivnyh ugol'nyh jenergeblokov 660 i 1060 MVt // Jenergebepozapasnost' i jenergosberezenie. 2016. No. 4. P. 5–9.
2. Ivanickij M.S., Griga A.D. Perevod pyleugol'nyh kotlov na szhiganie prirodnoho gaza dlja sokrashhenija vybrosov benz(a)pirena v vozdushnyj bassejn // Vestnik MJeI. 2015. No. 2. P. 79–82.
3. Ivanickij M.S. Summarnaja agressivnost' gazovyh vybrosov pyleugol'nyh kotlov, obuslovlennaja komponentami nepolnoho sgoranija // Jenergosberezenie i vodopodgotovka. 2015. No. 5 (97). P. 70–75.
4. Teplovoj raschet kotlov (Normativnyj metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg: CKTI, VTI, 1998. 257 p.
5. Zel'dovich Ja.B., Sadovnikov P.Ja., Frank-Kameneckij D.A. Okislenie azota pri gorenii. Moskva, Leningrad: ANSSR, IFH. 1947. 142 p.

6. Brorstron-Lunden E., Lindsleog A. Degradation of PAH during simulated stacle gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // *Environmental Science and Technology*. 1985. V. 19. No. 4. P. 313–316.
7. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion // 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
8. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // *Combustion Science and Technology*. 1986. V. 50. No. 1–3. P. 79–115.
9. Tumanovskij A.G., Ol'hovskij G.G. Puti sovershenstvovaniya ugol'nyh TJeS Rossii // *Jelektricheskie stancii*. 2015. No.1. P. 67–73.
10. Somova E.V. Sozdanie pyleugol'nogo jenerglobloka na ul'trasverhkriticheskie parametry para v ramkah evropejskogo proekta AD-700 / E.V. Somova, A.L. Shvarc, Je.H. Verboveckij // *Jenergetik*. 2015. No. 2. P. 39–43.

Author of the publication

Ivanitskiy Maxim Sergeevich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. prof. of the department «Heat and power engineering and thermal engineering» (HPETE), Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

Поступила в редакцию

03 мая 2017 г.

УДК 661.961

ВОДОРОД – ЭНЕРГОНОСИТЕЛЬ И РЕАГЕНТ. ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

Н.Л. Солодова¹, Е.И. Черкасова¹, И.И. Салахов¹, В.П. Тутубалина²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия
cherkasova.kstu@yandex.ru

Резюме: Рассмотрены возможности применения водорода как альтернативного источника энергии и полупродукта в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Приведены основные способы производства водорода с подробным описанием процесса парового каталитического риформинга технологии и реактора, а также методов выделения высокочистого водорода и новых технологических решений для парового риформинга.

Ключевые слова: водород, топливо, энергия, источник, нефть, переработка, получение, природный газ, конверсия, оборудование.

HYDROGEN – THE ENERGY CARRIER AND THE REAGENT. THE TECHNOLOGY OF ITS RECEIPT

N. L. Solodova¹, E. I. Cherkasova¹, I.I. Salakhov¹, V. P. Tutubalina²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
cherkasova.kstu@yandex.ru

Abstract: The article analyzes the directions of using hydrogen, also as an alternative vehicle fuel, and methods of its preparation and concentration with a detailed description of the technology of catalytic conversion (steam reforming) of natural gas and its instrumentation.

Keywords: hydrogen, fuel, energy, source, oil, processing, receiving, natural gas, conversion, equipment.

В органической химии и нефтехимии, а также в нефтепереработке водород играет ключевую роль при проведении процессов гидроочистки, гидроизомеризации, гидрокрекинга. Его можно применять как альтернативное экологически чистое топливо, заменяющее бензин, керосин и дизельное топливо. В связи с ограниченными запасами углеводородного сырья идет интенсивная работа по поиску альтернативных источников энергии и энергоносителей. Альтернативным является перевод двигателей внутреннего сгорания на водородное или бензино-водородное композиционное топливо.

Основное внимание на развитие водородной энергетики было обращено в середине 70-х годов в разгаре первой волны энергетического кризиса. Оно основывалось на представлении о водороде как альтернативном экологически чистом топливе, удельный вес которого в топливно-энергетическом комплексе предполагался соизмеримым с удельным весом органического топлива.

В прошлом столетии на всемирном уровне было организовано и проведено множество научных мероприятий, посвященных водородной тематике, где было высказано мнение о том, что широкое применение водорода в энергетике предоставляет человечеству уникальный шанс выжить в мире, избавленном от экологических и социальных катастроф. Однако сегодня этот вопрос стоит еще более остро. Систематически на страницах информационно-аналитических изданий появляются сообщения о применении водорода в различных установках, включая также авиадвигатели. Приводятся данные об экологических, технологических, экономических и механических аспектах применяемого сырья и технологии.

Следует отметить, что сегодня мир очень близок к реализации программы пилотного перехода на водородное топливо и/или бензино-водородную композиционную топливную смесь для применения в двигателях внутреннего сгорания. Создана система обеспечения водородной заправки по трансевропейской магистрали.

Вступление в силу нового технического регламента и переход к новым классам топлива с пониженным содержанием серы и ароматических углеводородов предъявляют все более высокие требования к качеству водорода, используемого в процессах гидроочистки и изомеризации, роль которого в последнее время возрастает. Неуклонное повышение требований к чистоте и полноте извлечения водорода происходит как и в химической, так и в нефтехимической отраслях [1].

В химической промышленности водород является одним из основных полупродуктов: он используется в производстве аммиака, метанола, синтетических моторных топлив, при глубокой переработке нефти. Затраты водорода в этих отраслях составляют от 50 до 200 тонн на 1000 тонн готовой продукции. От 1 до 5% получаемого водорода находит применение в малотоннажных наукоемких отраслях промышленности: электронной, фармацевтической, пищевой, при выплавке металлов и сплавов высокой чистоты, синтезе химически высокоактивных веществ и т.д.

Удельный вес стоимости водорода в эксплуатационных затратах при гидрогенизационной обработке нефтяного сырья составляет 40–75% [2]. Высокая стоимость водорода обусловлена большими капитальными вложениями в установки для его получения и эксплуатационными затратами, а также расходами, связанными с транспортировкой, хранением и обеспечением безопасности, так как водород является одним из самых взрывоопасных и пожароопасных веществ.

Переход на использование топлив с пониженным содержанием серы и ароматических углеводородов связан с более высокими требованиями к качеству водорода, используемого в процессах гидроочистки и изомеризации [3, 4].

Интенсивное развитие гидрогенизационных процессов переработки нефтяного сырья невозможно без достаточных ресурсов водорода. Основное количество водорода на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) получают в процессе каталитического риформинга, в котором он образуется в качестве побочного продукта. Однако потребность гидропереработки, мощности которой возросли быстрее, чем мощности переработки самой нефти, сильно определяют возможности риформинга или получения водорода из отходящих газов.

Каталитический риформинг в России обеспечивает примерно 50% потребности гидрогенизационных процессов в водороде, поэтому эта проблема решается целенаправленным производством водорода [5].

На НПЗ России вырабатывается около 1 млн. тонн в год водородсодержащего газа. Кроме того, на 7 НПЗ находятся в эксплуатации специализированные установки, на которых производят ~ 120 тыс. тонн водорода в год [1, 6].

Для обеспечения водородом намеченных к вводу до 2020 года 8 установок каталитического крекинга с предварительной гидроочисткой исходного вакуумного газойля мощностью 11 млн тонн в год; 16 установок гидрокрекинга вакуумного газойля мощностью около 11 млн тонн в год; 6 установок гидрокрекинга остаточного сырья и 3 установок

гидроконверсии потребуется дополнительно около 1 млн тонн водорода. Для этого к 2020 году планируется строительство 14 специальных установок [6].

В настоящее время в мировой нефтеперерабатывающей промышленности применяют следующие установки получения водорода:

- каталитического риформинга;
- пиролиза;
- паровой каталитической конверсии углеводородов;
- газификации нефтяных остатков;
- электролиза воды.

Основное количество водорода (до 96%) производится путем паровой каталитической конверсии обычно природного газа, в результате которой получается технический водород с чистотой 96–97% об. Такой водород пригоден для гидроочистки и гидрокрекинга [7, 8].

Паровая каталитическая конверсия (или каталитический паровой риформинг) легких углеводородов, а также прямогонных бензинов является самым эффективным способом получения водорода. Процесс включает в себя стадии:

- подготовка сырья гидрообессеривание;
- паровой риформинг;
- утилизация тепла продуктов реакции;
- адиабатическая конверсия оксида углерода при высокой температуре;
- очистка водорода с помощью короткоциклового адсорбционного процесса.

Современные установки такого типа имеют мощность от 300 тыс. до 3 млн м³ водорода в сутки, рабочее давление в них 2–3 МПа. Чистота водорода на современных установках достигает 99,99% об. [9, 10]. Достоинства этого способа – возможность работы без дорогостоящих окислителей (кислорода), легкость создания установок большой производительности и получения водорода высокой степени чистоты. Поточная схема процесса показана на рис. 1 [11, 12].

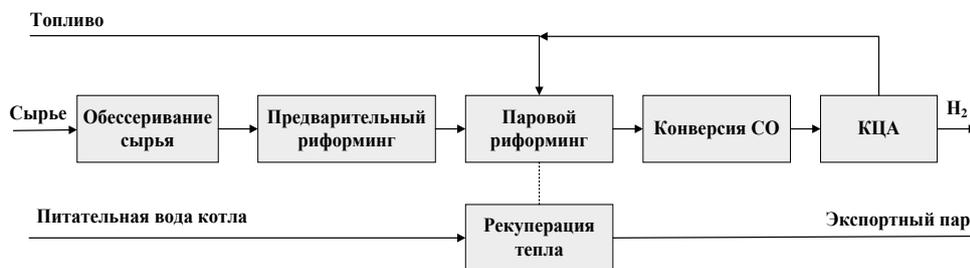
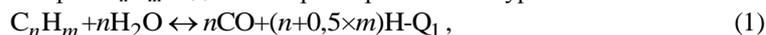


Рис. 1. Поточная схема паровой каталитической конверсии

Подготовка сырья может включать сжатие сырьевых газов или испарение нефти, или сжиженных углеводородов (СУГ). Современные технологии позволяют использовать различные виды сырья – природный газ, нефтяной газ, СУГ, газы нефтеперерабатывающих заводов, а также хвостовые газы установок синтеза Фишера-Тропша.

Обессеривание сырья происходит обычно в два этапа – гидрирование органических сернистых соединений до сероводорода и адсорбция его на оксиде цинка. Попеременная работа двух реакторов обессеривания обеспечивает замену адсорбента в одном реакторе, в то время как установка продолжает работать при полной мощности.

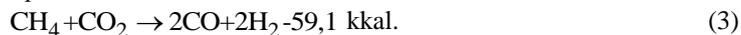
Печь риформинга имеет равномерный профиль температуры по всей длине труб. Конверсия углеводородного сырья C_nH_m водяным паром протекает по уравнениям:



где n , m – число атомов углерода и водорода в молекуле углеводорода.

Выход водорода будет тем больше, чем выше его содержание в молекуле углеводородного сырья. С этой точки зрения наиболее благоприятным сырьем является метан, в молекуле которого содержится 25% мас. водорода [13]. Источником метана являются природные газы с концентрацией метана 94–99% об.

Первая реакция протекает с высоким эндотермическим тепловым эффектом (при конверсии метана $Q_i = 206,7$ кДж/моль) и является термодинамически высокотемпературной. Вторая стадия является экзотермической, и термодинамически для нее благоприятны низкие температуры. Поэтому на практике процесс паровой каталитической конверсии осуществляют в две ступени при оптимальной для каждой стадии температуре. Метан может реагировать с образующимся диоксидом углерода по схеме



Давление оказывает отрицательное влияние на равновесие основной реакции конверсии метана, и поэтому требуется более высокая температура для достижения одинаковой степени превращения углеводородного сырья. Однако процесс предпочитают проводить под повышенным давлением, поскольку полученный водород используется в гидрогенизационных процессах, проводимых под давлением. При этом снижаются затраты на компримирование и повышается производительность установки.

Помимо температуры и давления на равновесие основных реакций существенное влияние оказывает молярное соотношение водяной пар: углеводород сырья. Очевидно, что при увеличении этого соотношения сверх стехиометрической концентрация метана в газах конверсии будет снижаться, то есть равновесие реакции сдвинется в сторону более глубокого превращения метана [14].

Однако даже в случае большого избытка водяного пара не удастся полностью проконвертировать оксид углерода.

В процессе паровой конверсии углеводородов помимо основных реакций при определенных условиях возможно выделение элементарного углерода вследствие термического распада углеводорода по реакции



Вероятность выделения углерода возрастает при увеличении числа углеродных атомов в углеводороде, повышении давления и уменьшении отношения вода: углерод. Наиболее вероятно образование углерода в интервале температур 500–750 °С. При температурах выше 750 °С образование углерода менее вероятно в результате усиления его реакций газификации водяным паром и диоксидом углерода. Поэтому на практике паровую каталитическую конверсию проводят при двух и более кратном избытке водяного пара, по сравнению со стехиометрией.

Конверсию метана с водяным паром можно проводить без катализатора, а также в присутствии гетерогенных катализаторов. Без катализатора процесс протекает с приемлемой скоростью и глубиной при температуре 1250–1350 °С. Катализаторы предназначены не только для ускорения основных реакций, но и для подавления побочных реакций пиролиза путем снижения температуры процесса до 800–900 °С. Наиболее активными и селективными катализаторами конверсии метана признаны никелевые, состав которых зависит от качества исходного сырья и условий процесса конверсии. С целью интенсификации реакций газификации углерода в никелевые катализаторы вводят щелочные добавки – оксиды Са и Mg.

Паровую конверсию оксида углерода проводят в две ступени: сначала при температурах 480–530 °С на среднетемпературном железохромовом катализаторе, затем при 400–450 °С на низкотемпературном цинкхроммедном катализаторе. Для приготовления катализаторов используются термостойкие и механические прочные носители с развитой поверхностью типа оксида алюминия. Обычно катализаторы иницируют и распад метана на элементы; он протекает с заметной глубиной уже при температуре 400–450 °С. Никелевые

катализаторы легко отравляются сероводородом или сероорганическими соединениями, присутствующими в сырье, с образованием сульфида никеля. Во избежание отравления никелевых катализаторов при температуре до 800⁰С содержание общей серы в исходном углеводородном сырье не должно превышать 2–3 мг/м³. При температурах выше 800–900⁰С допускается большое содержание серы, поскольку опасность отравления снижается: при 900⁰С – 50 мг/м³, при 1000⁰С – 100–150 мг/м³, при 1100⁰С 300–400 мг/м³. В жидком сырье – легких бензиновых фракциях – содержание серы не должно превышать 0,0005% мас. [14].

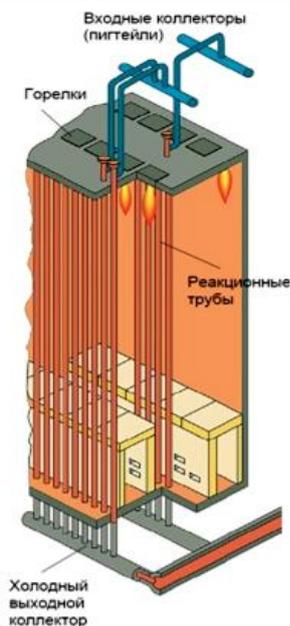


Рис. 2. Печь парового риформинга

Конверсию паром (паровой риформинг) проводят в трубчатых реакторах типа трубчатой печи, в которых тепло, получающееся от сжигания топлива, нагревает стенки труб, находящийся в трубах катализатор и парогазовую смесь до температуры реакции.

В процессе конверсии трубы испытывают высокие термические напряжения, так как температура стенок достигает 950–1050⁰С. Печь коробчатой формы (рис. 2), оборудована вертикально расположенными центробежнолитыми микросплавными трубами, заполненными катализатором и расположенными несколькими параллельными рядами. Трубы изготовлены из стали, содержащей хром (25%) и никель (20%), обладающей значительным сопротивлением на разрыв и растяжение. Тепло для эндотермической реакции и подогрева смеси сырья и пара сообщается двумя рядами горелок, расположенных в потолочной части печи.

Технологическая схема установки парового риформинга при давлении 2,0–2,5 МПа показана на рис. 3.

Сырье (природный или нефтезаводской газ) сжимают компрессором до 2,6 МПа, подогревают в подогревателе, в конвекционной секции печи-реакторе до 300–400⁰С и подают в реакторы P-1 и P-2 для очистки от сернистых соединений.

В P-1, заполненном алюмокобальтмолибденовым катализатором, осуществляют гидрогенолиз сернистых соединений, а в P-2 – адсорбцию образующегося сероводорода на гранулированном поглотителе, состоящем в основном из оксида цинка (481-Zn, ГИАП-10 и др.), до остаточного содержания серы в сырье < 1 ppm.

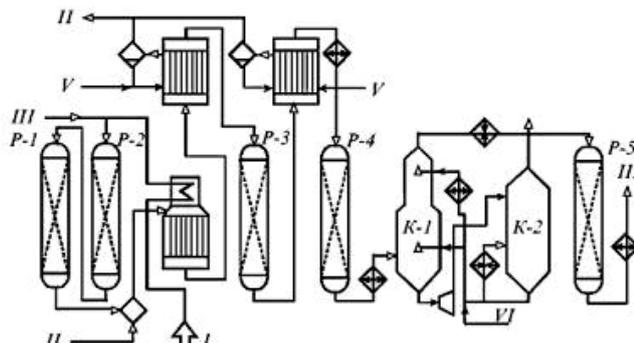


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема установки для производства водорода:

I – сырье; II – водяной пар; III – водород; IV – двуокись углерода;
V – вода; VI – водный раствор карбоната калия

В случае использования в качестве сырья бензина, последний подают насосом и на входе в Р-1 смешивают с водородсодержащим газом.

К очищенному газу в смесителе добавляют перегретый (до 400–500⁰С) водяной пар, и полученную парогазовую смесь подают в печь паровой конверсии. Конверсию углеводородов проводят при 800–900⁰С и давлении 2,2–2,4 МПа в вертикальных трубчатых реакторах, заполненных никелевым катализатором, размещенных в радиантной секции печи в несколько рядов и обогреваемых с двух сторон теплом сжигания отопительного газа. Отопительный газ подогревают до 70–100⁰С, чтобы предотвратить конденсацию воды и углеводородов в горелках. Дымовые газы с температурой 950–1100⁰С переходят из радиантной секции в конвекционную, где установлены подогреватель сырья и котел-утилизатор для производства и перегрева водяного пара.

Конвертированный газ направляют в котел-утилизатор, где охлаждают до 400–450⁰С и подают на I ступень среднетемпературной конверсии оксида углерода над железохромовым катализатором (Р-3). После охлаждения до 230–260⁰С в котле-утилизаторе и подогревателе воды парогазовую смесь далее направляют на II ступень низкотемпературной конверсии монооксида углерода в реактор Р-4 над цинкхроммедным катализатором. Смесь водорода, диоксида углерода и водяного пара охлаждают затем в теплообменниках до 104⁰С и направляют на очистку от СО₂ в абсорбер К-1 горячим раствором К₂СО₃.

Диоксид углерода удаляют регенерированным раствором карбоната калия в две ступени. На I ступень для абсорбции основной части СО₂ подают более горячий раствор К₂СО₃ в середину абсорбера. Доочистку от СО₂ проводят в верхней части абсорбера, куда подводят охлажденный в теплообменниках до 60–80⁰С раствор К₂СО₃.

Насыщенный диоксидом углерода раствор К₂СО₃ подают в турбину, где давление его снижают с 2,0 до 0,2–0,4 МПа, а затем – в регенератор К-2. В результате снижения давления и дополнительного подвода тепла в куб К-2 из раствора десорбируется диоксид углерода. Регенерированный раствор К₂СО₃ возвращают в цикл.

Водородсодержащий газ из абсорбера К-1, подогретый в теплообменнике до 300⁰С, направляют в реактор метанирования Р-5, заполненный никелевым катализатором, промотированный оксидами Mg и Сг. После метанирования водород охлаждают в теплообменниках и холодильниках до 30–40⁰С и компрессорами подают потребителю.

Процесс включает основные стадии:

- очистку сырья от сернистых соединений;
- каталитическую конверсию сырья;
- двухступенчатую конверсию оксида углерода;
- очистку технологического газа от диоксида углерода абсорбцией водяным раствором карбоната калия;
- метанирование остатков оксида углерода.

После конверсии в газе содержится некоторое количество СО, СО₂ и СН₄.

Следует отметить, что используемые процессы парового риформинга характеризуются недостаточно высокой концентрацией водорода 75–80% мас. Для гидрокрекинга и глубокой гидроочистки требуется высококонцентрированный водородсодержащий газ (99–99,9% мас. Н₂), поэтому возникает необходимость дооборудования производства водорода блоками его концентрирования.

В современной нефтепереработке используются три основных процесса концентрирования водорода:

- селективная фильтрация через полимерные мембраны;
- короткоцикловая адсорбция (КЦА);
- криогенное разделение.

Выбор того или иного способа выделения водорода зависит от экономических показателей и гибкости технологии [12–14].

В производстве высокочистого водорода (99,9% и выше) наиболее часто используется короткоцикловая адсорбция. Ее особенностями являются высокая степень извлечения примесей, низкие эксплуатационные расходы и простота работы. Агрегат КЦА поставляется как комплектный блок, в нем примеси CO, CO₂ и CH₄ адсорбируются при высоком давлении и десорбируются при низком. Так как процесс циклический, то для обеспечения постоянства продуктовых и сырьевых потоков используют несколько (от 4 до 12) адсорберов, работающих в шахматном порядке.

Новым технологическим решением для процесса каталитического парового риформинга является введение в схему блока предварительного риформинга [11, 12].

Предварительный риформинг – это паровой риформинг углеводородов при низкой температуре в простом адиабатическом реакторе с использованием высокоактивного катализатора на основе никеля, который способствует реакции парового риформинга при низкой температуре. Исходное сырье — от природного газа до нефти – преобразуется в ходе процесса в реакционную массу, содержащую водород, оксиды углерода, метан и водяной пар. При использовании предварительного риформинга достигается экономия топлива, увеличение гибкости установки по отношению к используемому сырью, снижение общего соотношения пар: углерод, меньшие размеры печи, снижение выброса дымовых газов.

Научно-исследовательские разработки ведущих зарубежных фирм проводятся в направлении расширения ресурсов сырья для получения водорода этим методом, совершенствования технологической схемы процесса и отдельных стадий, подбор новых более совершенных катализаторов [15–17].

В ОАО «ВНИИ НП» разработана и реализована в промышленности современная технология паровой каталитической конверсии углеводородных газов, которая по уровню показателей не уступает технологиям передовых зарубежных фирм [2].

Все более заметной альтернативой паровому риформингу становится газификация тяжелых нефтяных фракций и нефтяного кокса, которая часто сопровождается выработкой электроэнергии. Процесс основан на крайне экзотермичных реакциях, проводимых в камере сгорания. Он обладает высокой гибкостью относительно используемого сырья. Однако его распространению мешают высокие капитальные затраты (по сравнению с паровым риформингом) и значительный расход кислорода. В качестве сырья в процессе могут быть использованы уголь, биомасса, нефтяные остатки, природный газ.

В мире насчитывается 165 установок газификации и еще примерно 30 находятся на стадии строительства и проектирования [17]. Фирмами *Texaco* и *Shell* разработаны процессы получения синтетического газа (некаталитические процессы частичного окисления) [18]. Обе схемы дают газ, состоящий главным образом из H₂ и CO, а также некоторого количества CO₂, H₂S, CH₄ и сажи. Химизм реакции довольно сложен и в идеале выражается уравнением



Могут также протекать реакции с образованием углерода, горение углерода, паровой риформинг и др.

В газификаторе *Shell* реакции осуществляются путем инъекции в камеру сгорания через горелку специальной конструкции предварительно подогретых тяжелого нефтяного сырья, кислорода и водяного пара. Реактор выполнен из стали с огнеупорной футеровкой, работает под давлением от 25 до 60 атм. и температуре около 1300⁰С. Тепло реакционной массы используется для получения водяного пара высокого давления, в отличие от технологии *Shell*, когда углеводородное сырье, водяной пар и кислород по отдельности подводятся к горелке реактора, на выходе из которой подвергаются смешиванию. В процессе *Texaco* углеводородное сырье смешивается с паром и кислородом перед подачей в горелку. Рабочие давление и температура в процессе *Texaco* выше, чем в *Shell*, и составляют, соответственно, 80 атм. и 1450⁰С.

Производить водород путем газификации целесообразно в регионах, где существует дефицит природного газа, а также ужесточающиеся нормативы на выброс оксидов серы.

Существующие технологии получения водорода с применением трубчатых печей, шахтных реакторов, с использованием кислорода и др. характеризуются большими капитальными вложениями и эксплуатационными затратами. Кроме того, установки, работающие по традиционным технологиям, сбрасывают в окружающую среду с отходящим дымовым газом большое количество вредных веществ (CO , NO_x).

ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ» предложена новая технология получения синтез-газа, водорода, высокоэффективного экологически чистого способа сжигания топлива [19, 20]. Получение водорода по новой технологии основано на использовании каталитических реакторов, теплообменных и массообменных аппаратов, беспламенных горелок и другого оборудования нового поколения, а также на применении энергосберегающих технологий получения синтез-газа, водорода, высокоэффективного экологически чистого способа сжигания топлива и др., созданных ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ».

Использование каталитического реактора конструкции ФАСТ ИНЖИНИРИНГ® (рис. 4) обеспечило: проведение каталитического процесса при оптимальных температурных условиях во всем объеме катализатора; равномерное распределение реакционной среды по зернистому слою; возможность применения наиболее активного мелкозернистого катализатора [21] при сохранении низкого гидравлического сопротивления зернистого слоя.

Каталитический реактор конструкции ФАСТ ИНЖИНИРИНГ® представляет собой цилиндрический корпус с установленными вдоль оси аппарата спиралеобразными стенками, которые в сечении, перпендикулярном оси аппарата, имеют форму спирали Архимеда.



Рис. 4. Схема реактора нового поколения (адиабатические условия)

Преимущества каталитических реакторов новой конструкции:

- возможность использования наиболее активного мелкозернистого катализатора при сохранении низкого аэродинамического сопротивления зернистого слоя;
- обеспечение подвода необходимого количества теплоты при сильноэндотермических реакциях и отвода необходимого количества теплоты при сильно экзотермических реакциях;
- возможность поддержания оптимальной температуры в узком диапазоне по всему объему зернистого слоя катализатора;
- отсутствие локальных перегревов катализатора как при его восстановлении, так и при эксплуатации;
- равномерное распределение реакционной среды по всему объему катализатора;
- возможность создания реактора на требуемую производительность, в том числе малую;
- обеспечение условий для увеличения срока службы катализатора за счет создания благоприятных условий при его эксплуатации;
- возможность проведения каталитического процесса при оптимальном давлении;
- компактность.

Автотермический риформинг представляет собой комбинацию процессов парового риформинга и частичного окисления в одном реакторе (парциальное каталитическое окисление). Сырье и водяной пар подогреваются перед поступлением в камеру сгорания адиабатического реактора, где углеводороды и кислород смешиваются и происходит реакция

частичного окисления с выделением тепла, которое используется для последующих эндотермических реакций:

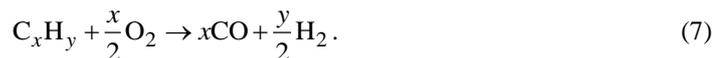


Образовавшиеся продукты реакции проходят в том же реакторе через никелевый катализатор риформинга на носителе, состоящем из оксидов магния и алюминия, где пар регенерирует с оставшимся сырьем, образуя синтез-газ. Основной аппарат установки – реактор переменного сечения с огнеупорной футеровкой. В зауженной сверху зоне, где установлена горелка специальной конструкции, происходит горение. Катализатор размещается в нижней части реактора.

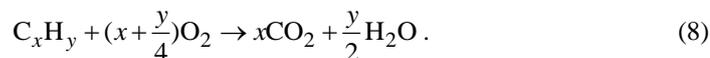
Хотя паровой риформинг – устоявшаяся технология, различными фирмами ведутся работы по его улучшению, затрагивающие технологию, катализаторы, конструкцию реакторов [12]. Для парового риформинга высших углеводородов разработано несколько технологических схем, в числе которых мембранный риформинг в циркулирующем, псевдооживленном слое катализатора. Реакторы такого процесса относятся к третьему поколению. Ко второму и первому поколению относятся, соответственно, реакторы мембранного риформинга с барботажем через псевдооживленный слой и парового риформинга с плотным слоем катализатора.

Автотермический процесс с прямым контактом холодных компонентов сырья — воды и углеводорода и горячего циркулирующего катализатора является лучшей схемой, в которой оптимизированы выход водорода и потребление энергии.

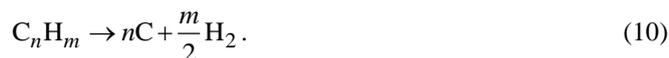
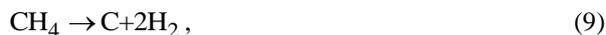
Каталитическое частичное окисление может в настоящее время рассматриваться как альтернатива паровому риформингу в децентрализованном производстве водорода из ископаемых топлив. Считается, что этот процесс может быть использован для стационарных и мобильных топливных элементов – камер сгорания газовых турбин, металлургии. Наиболее подходящим сырьем для стационарного использования является метан, а для мобильной установки предпочтительны жидкие углеводороды. Процесс окисления метана, этана, *n*-бутана и высших углеводородов осуществляется в реакторах с коротким временем контакта (несколько миллисекунд) в присутствии родиевых катализаторов при температуре порядка 800⁰С. Суммарная реакция углеводорода C_xH_y и воздуха заключается в образовании синтез-газа:



Конкурирующая реакция – экзотермическая, полное окисление исходного углеводорода:



В качестве побочных реакций происходит образование олефинов – паровой риформинг. Водород может быть получен в результате разложения углеводородов при нагревании без доступа воздуха:



Процесс осуществляется в реакторах с псевдооживленным слоем алюмоникелиевого катализатора. На нем откладывается углерод, который выжигается с катализатора в регенераторе.

Процесс каталитического разложения метана на металлических катализаторах позволяет получать очень чистый водород без образования оксидов углерода, что исключает необходимость разделения газообразных смесей. К достоинствам этого процесса можно отнести его меньшую, по сравнению с паровой конверсией (риформингом), эндотермичность и возможность замены углеродной сажи твердым углеродом.

Водород можно получать из синтез-газа, но его в настоящее время в основном используют для синтеза метанола и аммиака. И только вторым по значимости идет производство водорода для гидрогенизационных процессов на НПЗ [22].

Литература

1. Мейерс Р.А. Основные процессы нефтепереработки. Справочник: пер.с англ. под ред. Глаголевой О.Ф., Лыкова О.П. 3-е изд. СПб.: Профессия, 2012. 944 с.
2. Каминский Э.Ф., Хавкин В.А. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты. М.: Техника, 2001. 384 с.
3. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. СПб.: Недра, 2013. 544 с.
4. Капустин В.Н., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. Часть 2. Деструктивные процессы. М.: КолосС, 2007. 334 с.
5. Капустин В.Н., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. Часть 2. Физико-химические процессы. М.: Химия, 2015. 400 с.
6. Козин В.Г., Солодова Н.Л., Башкирцева Н.Ю., Абдуллин А.И. Современные технологии производства компонентов моторных топлив. Казань: КГТУ, 2009. 328 с.
7. Анчита Х., Спейт Дж. Переработка тяжелых нефтей и нефтяных остатков. Гидрогенизационные процессы: пер.с англ. под ред. Глаголевой О.Ф. СПб.: Профессия, 2012. 384 с.
8. Астановский Д.Л., Астановский Л.З., Кустов П.В. Энергосберегающее, экологически чистое получение водорода из углеводородного сырья // Нефтегазохимия. 2016. № 3. С. 10–16.
9. Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. Технология переработки природного газа и газового конденсата. Оренбург: Газпромпечат, 2002. 432 с.
10. Паркаш С. Справочник по переработке нефти: пер.с англ. под ред. Беляева И.А., Лындина В.Н. М.: Премиум Инжиниринг, 2012. 776 с.
11. Минигуллов Р.Р., Камалова Г.Ф., Солодова Н.Л. Водород – энергоноситель будущего. Новые технологии в промышленном производстве водорода // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Энергосбережение и инновационные технологии в ТЭК». Казань, 2014. С. 201–203.
12. Компания Linde Engineering URL: <http://www.linde-engineering.ru/ru/> (дата обращения: 15.03.2017).
13. Uhde GmbH «The Unde stream methane reformer technology», 2013.
14. Linde AG «Gasification technology», 2014.
15. Орочко Д.И., Сулимов А.Д., Осипов Л.Н. Гидрогенизационные процессы в нефтепереработке. М.: Химия, 1976. 350 с.
16. Rostrup-Nielsen J.R. and Rostrup-Nielsen Large-scale hydrogen production, Catech, 106–150, 2002
17. Minchener A.J. Fuel. 89,2222. 2005
18. Song X. and Gno Z. A new process for synthesis gas by co-gasufing coal and natural gas. Fuel. 84, 525. 2005.
19. Патент РФ № 784148 Способ двухступенчатой каталитической конверсии углеводородного сырья / Сосна М.Х., Харламов В.В., Семенов В.П., Кондращенко В.Д., Алексеев А.М. 17.02.93 г.
20. Астановский Д.Л., Астановский Л.З. Реактор новой конструкции для проведения каталитических процессов // Катализ в промышленности. 2004. № 3. С. 37–43.
21. Астановский Д.Л., Фадеева Т.В., Семенова Т.А. Влияние форм и размеров гранул на активность экструзионного катализатора паровой конверсии природного газа // Химическая промышленность. 1998. № 9. С. 15.

22. Wender J. Reactions of synthesis gas/ Fuel Process / Technol. 48, 189. 1996.

Авторы публикации

Солодова Наталья Львовна – канд. хим. наук, доцент кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Черкасова Елена Игоревна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: cherkasova.kstu@yandex.ru.

Салахов Илишат Илгизович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Тутубалина Валерия Павловна – д-р техн. наук, профессор, глав. науч. сотрудник Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Mejers R.A. Osnovnye processy neftepererabotki. Spravochnik: per.s angl. pod red. Glagolevoj O.F., Lykova O.P. 3-e izd. SPb.: Professija, 2012. 944 p.
2. Kaminskij Je.F., Havkin V.A. Glubokaja pererabotka nefiti: tehnologicheskij i jekologicheskij aspekty. M.: Tehnika, 2001. 384 p.
3. Ahmetov S.A Tehnologija glubokoj pererabotki nefiti i gaza. SPb.: Nedra, 2013. 544 p.
4. Kapustin V.N., Gureev A.A. Tehnologija pererabotki nefiti. Chast' 2. Destruktivnyye processy. M.: KolosS, 2007. 334 p.
5. Kapustin V.N., Gureev A.A. Tehnologija pererabotki nefiti. Chast' 2. Fiziko-himicheskie processy. M.: Himija, 2015. 400 p.
6. Kozin V.G., Solodova N.L., Bashkirceva N.Ju., Abdullin A.I. Sovremennye tehnologii proizvodstva komponentov motornyh topliv. Kazan': KGTU, 2009. 328 p.
7. Anchita H, Spejt Dzh. Pererabotka tzhzhelyh neftej i nefitjanyh ostatkov. Gidrogenizacionnyye processy: per.s angl. pod red. Glagolevoj O.F. SPb.: Professija, 2012. 384 p.
8. Astanovskij D.L., Astanovskij L.Z., Kustov P.V. Jenergoberegajushhee, jekologicheski chistoe poluchenie vodoroda iz uglevodorodnogo syr'ja // Neftegazhimija. 2016. No. 3. P. 10–16.
9. Busygina N.V., Busygin I.G. Tehnologija pererabotki prirodno go gaza i gazovogo kondensata. Orenburg: Gazprompechat', 2002. 432 p.
10. Parkash S. Spravochnik po pererabotke nefiti: per.s angl. pod red. Beljaeva I.A., Lyndina V.N. M.: Premium Inzhiniring, 2012. 776 p.
11. Minigullov R.R., Kamalova G.F., Solodova N.L. Vodorod — jergonositel' budushhego. Novye tehnologii v promyshlennom proizvodstve vodoroda // Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Jenergoberezhenie i innovacionnyye tehnologii v TJeK». Kazan': 2014. P. 201–203.
12. Kompanija Linde Engineering URL: <http://www.linde-engineering.ru/ru/> (data obrashhenija: 15.03.2017).
13. Uhde GmbH «The Unde stream methane reformer technology», 2013.
14. Linde AG «Gasification technology», 2014.
15. Orochko D.I., Sulimov A.D., Osipov L.N. Gidrogenizacionnyye processy v neftepererabotke . M.: Himija, 1976. 350 p.
16. Rostrup-Nielsen, J.R. and Rostrup-Nielsen Large-scale hydrogen production, Cattech, 106–150, 2002.
17. Minchener A.J. Fuel. 89, 2222. 2005
18. Song X. and Gno Z. A new process for synthesis gas by co-gasufing coal and natural gas. Fuel. 84, 525. 2005.

19. Patent RF No. 784148 Sposob dvuhstupenchatoj kataliticheskoj konversii uglevodorodnogo syr'ja / Sosna M.H., Harlamov V.V., Semenov V.P., Kondrashhenko V.D., Alekseev A.M. 17.02.93 g.

20. Astanovskij D.L., Astanovskij L.Z. Reaktor novoj konstrukcii dlja provedenija kataliticheskikh processov // Kataliz v promyshlennosti. 2004. No. 3. P. 37–43.

21. Astanovskij D.L., Fadeeva T.V., Semenova T.A. Vlijanie form i razmerov granul na aktivnost' jekstruzionnogo katalizatora parovoj konversii prirodno gaza // Himicheskaja promyshlennost'. 1998. No. 9. P. 15.

22. Wender J. Reactions of synthesis gas/ Fuel Process / Technol. 48,189. 1996.

Authors of the publication

Solodova Natalija L'vovna – Cand. Sci. (Chim.), Assoc. Prof. of department “Chemical technology of processing of oil and gas” Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Cherkasova Elena Igorevna – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department “Chemical technology of processing of oil and gas” Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Salakhov Ilshat Ilgizovich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department “Chemical technology of processing of oil and gas” Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Tutubalina Valerija Pavlovna – Dr. Sci. (Techn.), professor, chief researcher Kazan state power engineering university (KSPEU).

Поступила в редакцию

09 октября 2017 г.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИКЛА С НЕПРЯМОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ АБСОРБЕНТА

В.П. Данько¹, А.В. Дорошенко²

¹Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Краснодар, Россия

²Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина
vladislav.danko@mail.ru

Резюме: Разработаны основные принципы проектирования и схемные решения альтернативных систем жизнеобеспечения, принцип действия которых основан на реализации открытого абсорбционного цикла с солнечной регенерацией абсорбента. Такие системы позволяют обеспечивать: экологичность применения, уменьшение энергетических потерь, возможность комплексного жизнеобеспечения, включающего отопление, горячее водоснабжение, охлаждение и кондиционирование воздуха для жилых и производственных помещений. Количество вариантов таких схемных решений достаточно многообразно и определяется конкретными условиями решаемых задач охлаждения сред и кондиционирования воздуха. Все теплообменники аппараты, входящие в состав систем – двухконтурные, обеспечивающие бесконтактное охлаждение теплоносителя. Применено принципиально новое решение использовать теплообменники аппараты с подвижной насадкой, обеспечивающие возможность эксплуатации в экстремальных условиях (загрязненная среда, резкие колебания нагрузок), повышение предельных нагрузок, высокую поперечную равномерность (упрощение задачи масштабирования), нетребовательность к качеству распределения потоков.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, абсорбционный цикл, теплоноситель, отопление, кондиционирование, теплообменник, энергоэффективность.

ALTERNATIVE LIFE SUPPORT SYSTEM ON THE BASIS OF THE INDIRECT CYCLE WITH REGENERATION OF ABSORBENT

V.P. Danko¹, A.V. Doroshenko²

¹Plekhanov Russian University of Economics, Krasnodar, Russia

²Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine
vladislav.danko@mail.ru

Abstract: The basic principles of the design and schematics of alternative life support systems, whose operation is based on the implementation of the open absorption cycle with solar regeneration of the absorbent. Such systems allow to ensure the sustainability of the use, reduction of energy losses, possibility of complex life support, which includes heating, hot water supply, cooling and air conditioning for residential and industrial premises. The number of variants of such circuitry quite diverse and determined by the specific conditions of the tasks of cooling media and air-conditioning. All heat and mass transfer devices included in the system, double-circuit, providing non-contact cooling of the coolant. Applied new means to use heat and mass transfer devices with a movable nozzle, providing the ability to operate in extreme conditions (polluted environment, sharp fluctuations in loads), increasing extreme loads, high lateral uniformity (scale of problem simplification), undemanding to the quality of flow distribution.

Keywords: *alternative energy, absorption cycle, the heat carrier heating, air-conditioning, heat and mass transfer, heat exchanger, energy efficiency.*

Введение

Методы испарительного охлаждения сред хорошо известны. На их основе реализуются процессы охлаждения воды в градирнях, воздуха в воздухоохладителях, процессы в испарительных конденсаторах [1–5]. Работа таких охладителей основана на естественной неравновесности окружающей среды, проявляющейся в гигроскопической разности температур между «сухим» и «мокрым» термометрами наружного воздуха, причем температура воздуха по «мокрому» термометру является естественным пределом испарительного охлаждения сред. Этот процесс характеризуется малым потреблением энергии на его реализацию и сравнительной экологической чистотой применения. Практическое применение методов испарительного охлаждения сдерживается низкой эффективностью процесса при сравнительно высоких влагосодержаниях наружного воздуха.

Осушительно-испарительные системы разрабатываются в нескольких основных вариантах: адсорбционном и абсорбционном, последний тип – в вариантах с прямой и непрямой регенерацией абсорбента. На основании проведенного аналитического обзора сорбционных систем [1, 4] нами был выбран, в качестве основного решения, абсорбционный тип осушительно-испарительной системы с непрямой регенерацией абсорбента.

Цель данной работы разработка – основных принципов проектирования и компоновки альтернативных систем жизнеобеспечения (АСЖ), действие которых основано на реализации открытого абсорбционного цикла с солнечной регенерацией абсорбента. Такие системы позволяют обеспечивать экологичность применения, уменьшение энергетических потерь, возможность комплексного жизнеобеспечения, включающего отопление, горячее водоснабжение, охлаждение и кондиционирование воздуха для жилых и производственных помещений.

Анализ возможности использования открытого абсорбционного цикла для реализации процессов охлаждения и кондиционирования воздуха

Суть открытого абсорбционного цикла заключается в том, что наружный воздух предварительно осушается в условиях непрерывного цикла, так что при этом резко возрастают потенциалы испарительного охлаждения с использованием осушенного воздуха, который затем поступает в испарительный охладитель, где может быть обеспечено глубокое охлаждение среды в альтернативных системах АСЖ, либо в системах кондиционирования воздуха комфортного и технологического назначения (обеспечивается получение воздуха с требуемыми параметрами комфортности по температуре и относительной влажности). При этом процесс испарительного охлаждения может быть эффективен безотносительно параметров наружного воздуха (его относительной влажности и влагосодержания), то есть, использован повсеместно для решения указанных задач охлаждения сред и кондиционирования воздуха, не прибегая к искусственному холоду. По сравнению с традиционными решениями, с применением пароконденсационных охладителей сред, такие схемы обеспечивают значительное снижение энергопотребления и высокую экологическую чистоту [6].

Поддержание непрерывности осушительно-испарительного цикла обеспечивается в абсорбционных системах солнечной регенерацией абсорбента в десорбере-регенераторе.

Перспективность практического использования альтернативных систем жизнеобеспечения обосновывается их достоинствами:

– экологическая безопасность (проблема глобального потепления, озонобезопасность и пр.). В работах [1, 4] на основании методологии «Полный жизненный цикл» были

показаны высокие экологические преимущества осушительно-испарительных охладителей в сравнении с традиционными парокомпрессионными охладителями;

– более высокая энергоэффективность (примерно в два раза выше по сравнению с компрессионными охладителями, по данным зарубежных исследований [3, 7]);

– возможность решения задач комплексного жизнеобеспечения, включающего: отопление, горячее водоснабжение, охлаждение и кондиционирование воздуха для жилых и производственных помещений.

Однако этим системам присущи и недостатки:

– большие габариты, вызванные необходимостью создания большой тепломассообменной поверхности;

– большое число тепломассообменных аппаратов различного назначения, входящих в состав систем, что повышает стоимость оборудования;

– необходимость использования дополнительного нагревателя, компенсирующего недостаток теплоты, получаемой от солнечного коллектора для регенерации абсорбента, что позволяет достичь требуемые значения температур охлаждающих сред в АСЖ; в конечном итоге решение этой задачи требует снижения температурного уровня регенерации абсорбента;

– опасность загрязнения рабочих поверхностей тепломассообменной аппаратуры, входящей в состав осушительной части АСЖ (десорберов-регенераторов и абсорберов-осушителей), ввиду возможности отложения и кристаллизации водных растворов сорбентов, особенно при работе на высоких концентрациях абсорбента.

К сожалению, в подавляющем числе опубликованных работ вопросы взаимного согласования положительных и отрицательных сторон практического использования АСЖ не рассматриваются.

Основными направлениями для разрабатываемых систем, как показал опыт предыдущих исследований, являются:

– разработка и сравнительная оценка различных схемных решений осушительно-испарительных систем с непрямой регенерацией абсорбента [1, 4, 5, 7, 8];

– создание нового поколения тепломассообменной аппаратуры (ТМА) для альтернативных систем, характеризующегося малым весом и стоимостью с преимущественным использованием полимерных материалов. Наиболее отвечающим требованиям устойчивой работы ТМА является тип аппаратов с трехфазным псевдооживленным слоем подвижной насадки, способный к самоочищению рабочих поверхностей, что принципиально важно в случае абсорбционных систем, где используются водные растворы абсорбентов [9–13];

– проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов испарительного охлаждения, осушения воздуха (процесса абсорбции) и солнечной регенерации абсорбента в ТМА с подвижной псевдооживленной насадкой;

– сравнительный анализ экологических показателей традиционных и новых систем солнечного тепло- и холодообеспечения на основе методики «Полный жизненный цикл» (ПЖЦ), включая разработку методологии ПЖЦ применительно к специфике решаемых задач и ее практическое применение в направлении выбора основных решений [1].

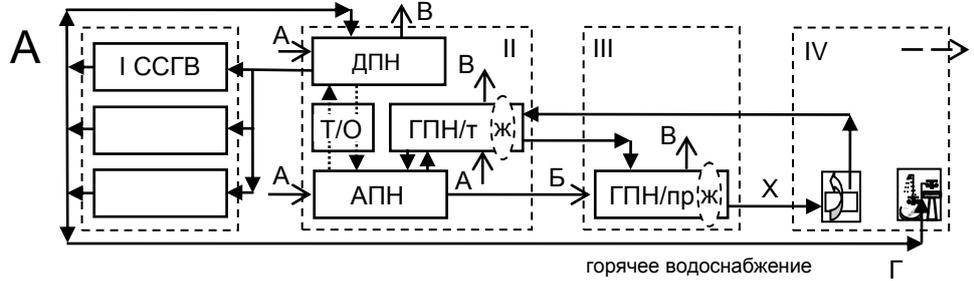
Основные принципы проектирования аппаратов и схемные решения альтернативных систем жизнеобеспечения

На рис. 1 показаны основные принципы построения альтернативных систем жизнеобеспечения. Солнечная холодильная система (в назначении АСЖ или ССКВ) включает два основных контура: осушительный (II) и охладительный (III).

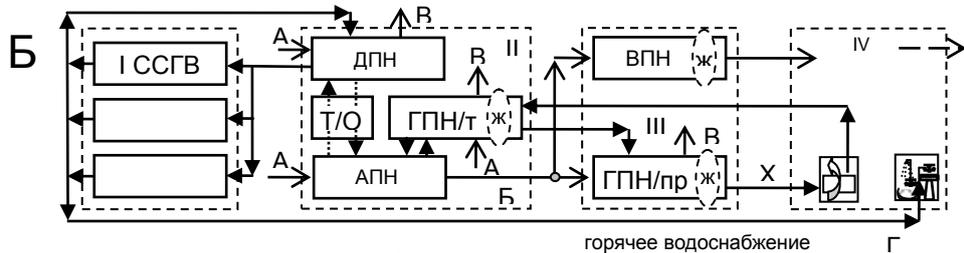
Контур осушения состоит из абсорбера, предназначенного для осушения воздуха, поступающего в помещение (АПН); десорбера, предназначенного для регенерации (повышения концентрации) раствора абсорбента (ДПН). Для стабильной работы АСЖ необходимо непрерывно охлаждать абсорбер (используется «технологическая» градирня), так как в процессе

осушения воздуха выделяется теплота, и подводить теплоту к десорберу для нагрева раствора абсорбента (используются солнечные коллекторы). Одним из новшеств предлагаемых схем является использование регенеративных теплообменников для передачи теплоты между теплоносителями: выходящим из абсорбера и направляющимся в десорбер [1, 5, 13].

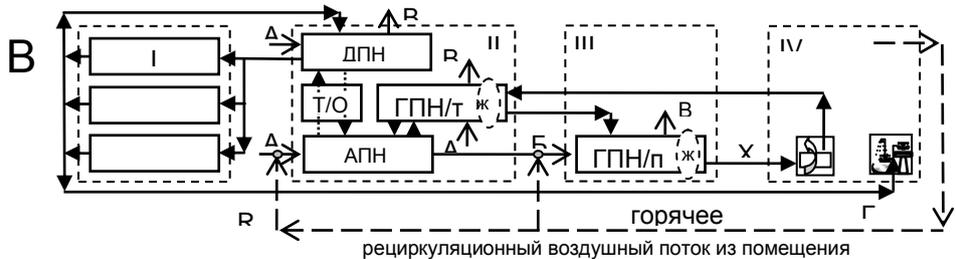
Охладительный контур АСЖ (III) включает испарительный охладитель воды, продуктовую градирню (ГПН/пр.) (рис. 1, а) либо воздухоохладитель (ВПН), обеспечивающий подачу в помещение воздуха, прошедшего необходимую термовлажностную обработку. Также широко используются комбинированные схемы (рис. 1, б), позволяющие подавать в помещение воздух с комфортными параметрами, так и охлажденную воду.



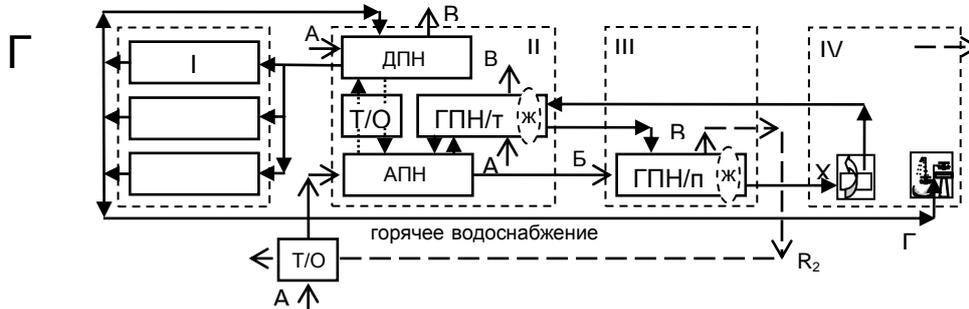
а) – наружный воздух



б) – осушенный в абсорбере воздух



в) – удаляемый воздушный поток



теплоносителей и рождает сильную нестабильность. Если дальше увеличивать скорость движения газа, то сила трения между фазами окажется больше силы тяжести и возникнет режим захлебывания, при котором движение жидкости будет направлено вверх и она будет уноситься из аппарата потоком газа [1].

Преимущества аппаратов с подвижной насадкой (ПН) перед другими типами контактных аппаратов, определившие их широкое распространение:

- устойчивая работа в загрязненных средах с самоочисткой насадочных поверхностей и стенок корпуса; высокая интенсивность процессов переноса в слое;
- малая чувствительность характеристик к резким колебаниям нагрузок по газу и жидкости;
- нетребовательность к первоначальному качеству распределения жидкости, что важно для промышленных аппаратов с ПН;
- высокая поперечная равномерность, упрощающая возможность масштабирования;
- широкий диапазон рабочих нагрузок (сообщается о значениях $q_{ж}$ до $200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ и w_r до 8 м/с , на пустое сечение аппарата);
- простота конструктивного оформления; компактность; малые вес и стоимость насадки; использование недефицитных материалов.

Аппараты с ПН – новое решение колонных аппаратов, обеспечивающее возможность эксплуатации в экстремальных условиях (загрязненные среды, резкие колебания нагрузок), повышение предельных нагрузок, высокую поперечную равномерность (упрощение задачи масштабирования), нетребовательность к качеству распределения потоков.

На рис. 2 показан вариант разработанных схем АСЖ в приложении к задачам охлаждения сред и кондиционирования воздуха. Схема включает две основные части: предварительного осушения воздуха и испарительного охлаждения.

В осушительной части регенерация раствора абсорбента осуществляется с помощью солнечных коллекторов 16 (17 – бак-теплоаккумулятор; 18 – дополнительный греющий источник, необходимость в котором определяется естественными колебаниями солнечной активности и изменяющимися рабочими параметрами солнечной системы).

Основными элементами приведенных схем являются: десорбер (ДПН), абсорбер (АПН), испарительный охладитель (ВПН) и система регенеративных теплообменников (рис. 2, позиция 8), необходимость в которых продиктована малыми располагаемыми температурными напорами. Воздушный поток 10 (свежий наружный воздух) при осушении в абсорбере АПН снижает влагосодержание X_r и величину температуры точки росы t_p , что обеспечивает значительный потенциал последующего испарительного охлаждения воды в градирне ГПН/пр или воздуха в воздухоохладителе ВПН.

В качестве всех тепломасообменных аппаратов ТМА, включенных в состав АСЖ (воздухоохладителя ВПН, абсорбера АПН, десорбера ДПН, градирен технологического и «продуктового» назначения ГПН), используются разработанные аппараты унифицированного типа с использованием подвижной шариковой насадки (трехфазный псевдооживленный слой «газ-жидкость-твердое тело»). Этот тип аппарата обеспечивает возможность самоочистки рабочих поверхностей и стенок корпуса ТМА, что при работе с наружным воздухом и растворами абсорбентов представляется принципиально важным условием поддержания работоспособности альтернативных систем. Это выгодно отличает и систему с подачей охлажденной воды в кондиционируемое помещение, которая нигде не контактирует с наружным воздухом.

Материалом для изготовления элементов насадки могут быть металлы, керамика, полимеры, дерево, кокс. Элементы насадок выполняют в виде тел вращения, пытаясь увеличить площадь поверхности, что повышает эффективность тепло- и массообмена. Основными формами являются сферы, шары, кольца, «седла», цилиндры, призмы. В ряде случаев применяют сетчатые (капиллярные) материалы.

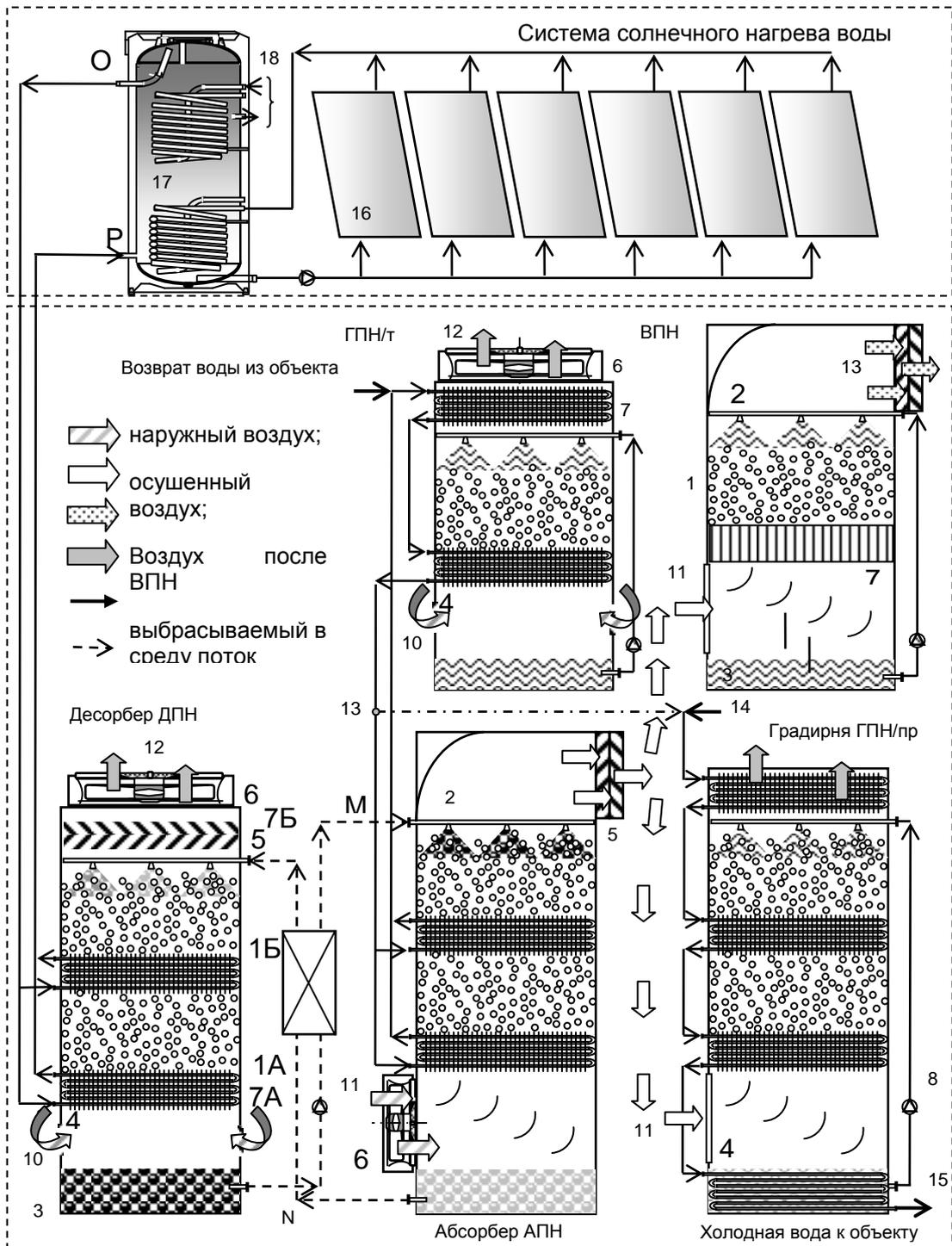


Рис. 2. Принципиальная схема многофункциональной солнечной системы МСС:
 1 – подвижная насадка; 2 – водораспределитель; 3 – емкость для воды; 4 – воздухопрямные окна; 5 – сепаратор; 6 – вентилятор; 7, 8 – теплообменники; 9 – насос; 10 – свежий воздух; 11 – осушенный воздух; 12 – удаляемый воздух; 13 – воздух из ВПН; 14 – горячая вода; 15 – охлажденная вода; 16 – солнечный коллектор; 17 – бак-теплоаккумулятор; 18 – дополнительный источник нагрева

Воздух, поступающий в градирню ГПН/пр, прошел процесс обработки в абсорбере и имеет низкую температуру точки росы, то есть высокий потенциал для последующей

реализации процесса испарительного охлаждения среды. Он может использоваться в охладителях, установленных непосредственно в помещениях или холодильных камерах. В случае задачи кондиционирования воздуха в ССКВ отпадает необходимость в воздуховодах, имеющих значительные размеры и требующих расходов на соответствующие строительные работы, особенно в случае уже построенных зданий. Вместо громоздких воздуховодов здесь используется прокладка теплоизолированных труб небольшого диаметра для охлажденной воды. Градирня ГПН/т технологического назначения обслуживает абсорбер-осушитель АПН и может быть использована в качестве первой ступени охлаждения «продуктовой» воды, перед охлаждением в ГПН/пр. Наличие технологической градирни ГПН/т в схеме вызвано тем, что в процессе абсорбции водяных паров из воздуха выделяется тепло и абсорбер нуждается в охлаждении. Приближение процесса абсорбции к изотермическому значительно повышает эффективность процесса абсорбции.

Гелиосистема в составе требуемого числа (площади приема солнечной энергии) солнечных коллекторов 16 и бака-теплоаккумулятора 17 с дублирующим источником нагрева 18 обеспечивает тепловую энергию для реализации процесса десорбции (восстановления абсорбента) в десорбере ДПН.

Применительно к разработанным альтернативным системам жизнеобеспечения на примере задачи кондиционирования воздуха на рис. 3, на h/x – диаграмме влажного воздуха проиллюстрированы термодинамические процессы, реализуемые в АСЖ при различных (предельных) значениях параметров наружного воздуха. В случае, когда исходное влагосодержание воздуха не превышает 16...17 г/кг (расчетные параметры Б и В), солнечная система обеспечивает осушение воздушного потока, вполне достаточное для последующего получения комфортных параметров воздуха в воздухоохладителе ВПН (процессы 2а–3а, 2б–3б, 2в–3в). Когда $x^1_{г}$ выше 17 г/кг, осушенный воздушный поток может быть разделен на две части, одна из которых обеспечивает получение холодной воды в ГПН (процесс 7а–8а) для предварительного охлаждения осушенного воздуха в воздухо-водяном теплообменнике (процесс 2а–24) и последующего охлаждения в ВПН (процесс 4а–5а) с получением требуемых комфортных параметров в помещении. Отметим, что для южных широт России начальное влагосодержание воздуха находится в пределах до 17 г/кг.

Выводы

1. В статье проведен анализ возможности использования открытого абсорбционного цикла для реализации процессов охлаждения и кондиционирования воздуха и обоснована перспективность практического использования альтернативных систем жизнеобеспечения.

2. Разработаны принципиально новые схемные решения альтернативных систем жизнеобеспечения, позволяющие, в зависимости от необходимости, осуществлять подачу холодной и горячей воды, производить отопление и технологическое или комфортное кондиционирование бытовых и офисных помещений.

3. На основе проведенных научных изысканий [5, 8, 13] разработаны инженерные принципы проектирования аппаратов альтернативных систем жизнеобеспечения и их базовые варианты.

4. Применительно к разработанным альтернативным системам жизнеобеспечения на примере задачи кондиционирования воздуха проиллюстрированы термодинамические процессы, реализуемые в АСЖ при различных (предельных) значениях параметров наружного воздуха.

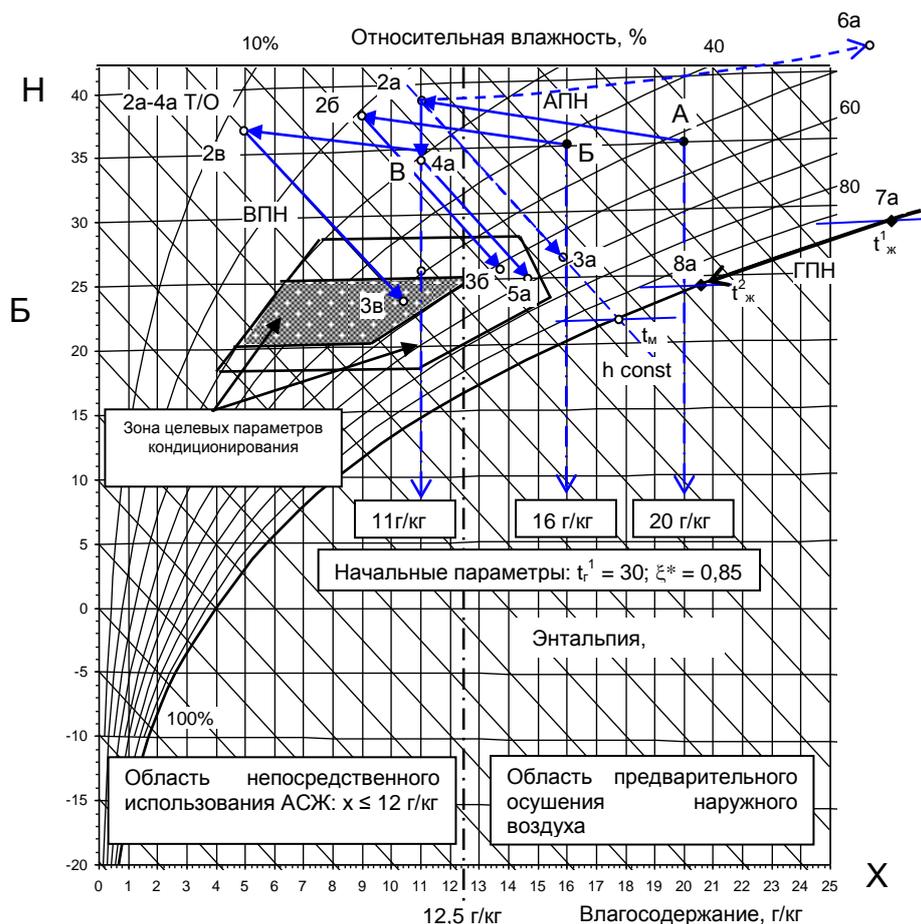


Рис. 3. Принципиальные возможности применения разработанных альтернативных систем жизнеобеспечения:

А–2а – процесс осушения воздуха; 2а–3а, 4а–5а – процессы в ВПН; 2а–4а – процесс в воздухо-водяном теплообменнике (вода от градирни); 2а–6а – изменение состояния воздуха в градирне; 7а–8а – охлаждение воды в градирне

Литература

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Данько В.П. Тепломассообменные аппараты с подвижной насадкой для традиционных и альтернативных энергетических систем. Испарительное охлаждение, осушение и кондиционирование воздуха: теория, эксперимент, практика. Донецк: Світ книги, 2013. 327 с.
2. Карнаух В.В. Интенсификация тепломассообменных процессов в вентиляторных градирнях пленочного типа: монография. Донецк: ДонНУЭТ, 2010. 159 с.
3. Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower /A.S. Kaiser, M. Lucas, A. Viedma and B. Zamora //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. No. 2. P. 986–999.
4. Данько В.П., Кудрин А.Б., Радионенко В.Н. Использование альтернативных источников энергии и вторичных энергоресурсов в холодильной отрасли. Ладапринт, 2015. 157 с.
5. Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Данько В.П., Глауберман М.А. Исследование процессов в тепломассообменных аппаратах с подвижной насадкой для солнечных multifunctional систем // Физика аэродисперсных систем. 2012. № 49. С. 14–26.
6. Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н. Влияние климатических факторов на

энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27.

7. The effect of low-concentration inorganic materials on the behaviour of supercritical water / Imre A. R., Hazi G., Horvath A., Maracz C., Mazur V., Artemenko S. // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. No. 1. P. 296–300.

8. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors / Arakelyan V.B., Danko V. P., Grigoryan R. P. // Journal of Contemporary Physics. 2017. Vol. 52. No. 1.

9. Крошилин А.Е., Крошилин В.Е. Корректное численное моделирование двухфазного теплоносителя // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 22.

10. Поддубный И.И., Разуванов Н.Г. Исследование гидродинамики и теплообмена при опускном течении жидкого металла в канале прямоугольного сечения в компланарном магнитном поле // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 13.

11. Shestova T.D., Markvart A.S., Lozovsky T.L., Zhelezny V.P. Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2013. Vol. 87. No. 6. P. 883.

12. Валуева Е.П., Пурдин М.С. Гидродинамика и теплообмен пульсирующего ламинарного потока в каналах // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 24.

13. Данько В.П., Карнаух В.В. Исследование влияния концентрации раствора абсорбента на охлаждающую способность тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 73–77.

14. Дорошенко А.В., Данько В.П., Турбовец Ю.Т. Металло-полимерные солнечные коллекторы с многоканальным абсорбером для многофункциональных энергетических систем // Проблемы региональной энергетики. 2012. № 2. С. 42–50.

Авторы публикации

Данько Владислав Павлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Торговля и общественное питание» Краснодарского филиала Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. E-mail: vladislav.danko@mail.ru.

Дорошенко Александр Викторович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Теплоэнергетика и трубопроводный транспорт энергоносителей» Одесской национальной академии пищевых технологий, г. Одесса, Украина.

References

1. Gorin A.N. (2013), Teplo-masso obmenniye apparati s podviznoy nasadkoy dla tradicionnich i alternativnich energeticheskikh system [Heat-mass exchangers with movable nozzle for traditional and alternative energy systems. Evaporative cooling. Dehumidification and conditioning for air (theory, experiment. practice)] // A.N. Gorin, A.V. Doroshenko, V.P. Danko, Donetsk, Ukraine.

2. Karnaukh V.V. (2010), Intensifikacia teplo-massoobmennich proceccov v ventilatornich gradirnach plonocnogo tipa [Intensification of heat-mass transfer processes in water cooling tower film-type], monograph, Donetsk, Ukraine.

3. Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower / A.S. Kaiser, M. Lucas, A. Viedma and B. Zamora //International Journal of Heat and Mass Transfer.-2005. No. 2. P. 986–999.

4. Ispol'zovanie al'ternativnyh istochnikov energii i vtorichnyh energo-resursov v holodil'noy otrasli [Use of alternative energy sources and secondary energy resources in refrigerating branch] / Danko V. P., Kudrin A. B., Radionenko V. N. // . Ladaprint, 2015. 157 p.

5. Issledovanie processov v teplomassoobmennykh apparatah s podvizhnoy nasadkoy dlya solnechnykh mnogofunkcional'nyh sistem [Research of processes in the teplomassoobmennykh devices with a mobile

nozzle for solar multipurpose systems] / Doroshenko A. V., Vasyutinskii S. Yu., Danko V. P., Glauberman M. A. // Fizika aerodispersnykh sistem [Physics of aerodisperse systems]. 2012. No. 49. P. 14–26.

6. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na energopotreblenie v otopitel'nyy sezon [Impact of climatic factors on energy consumption during the heating season] / Ginzburg A.S., Belova I.N., Reshetar O.A. // Teploenergetika [Thermal Engineering]. 2016. Vol. 63. No. 9. P. 621–627.

7. The effect of low-concentration inorganic materials on the behaviour of supercritical water / Imre A. R., Házi G., Horváth Á., Maráczy C., Mazur V., Artemenko S. // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. No. 1. P. 296–300.

8. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors / Arakelyan V.B., Danko V. P., Grigoryan R. P. // Journal of Contemporary Physics. 2017. Vol. 52. № 1.

9. Korrektnoe chislennoe modelirovanie dvufaznogo teplonositelya [Correct numerical simulation of a two-phase coolant] / Kroshilin A.E., Kroshilin V.E. // Teploenergetika [Thermal Engineering]. 2016. Vol. 63. No 2. p.p. 98–106.

10. Issledovanie gidrodinamiki i teploobmena pri opusknom techenii zhidkogo metalla v kanale pryamougol'nogo secheniya v komplanarnom magnitnom pole [Research of hydrodynamics and heat exchange at a lowering current of liquid metal in the channel of rectangular section in a coplanar magnetic field] / Poddubnyi I. I., Razuvanov N. G. // Teploenergetika [Thermal Engineering]. 2016. No 2. P. 13.

11. Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances / Shestova T. D., Markvart A.S., Lozovsky T.L., Zhelezny V.P. // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2013. Vol. 87. No. 6. P. 883.

12. Gidrodinamika i teploobmen pul'siruyushhego laminarnogo potoka v kanalah [Hydrodynamics and heat exchange of the pulsing laminar stream in channels] / Valueva E. P., Purdin M. S. // Teploenergetika [Thermal Engineering]. 2015. No 9. P. 24.

13. Danko V.P., Karnaukh V.V. (2016), Issledovanie vliyaniya koncentracii rastvora absorbenta na ohlazhdayushchuyu sposobnost' teplomassoobmennykh apparatov s podvizhnoy nasadkoj [Experimental researches of heat transfer in a layer moving fitting stripping contour solar systems]. Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda [Vestnik of International Academy of Refrigeration]. 2016. No. 3. P. 73–77.

14. Metallo-polimernyye solnechnyye kollektory s mnogokanal'nym absorberom dlya mnogofunktional'nykh energeticheskikh sistem [Metallo-polymeric solar collectors with multichannel absorber for multi-energy systems] / Doroshenko A.V., Dan'ko V.P., Turbovets YU.T. // Problemy regional'noy energetiki [Problems of regional energy]. 2012. No. 2. P. 42–50.

Authors of the publication

Danko Vladislav Pavlovich – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of the Trade and Catering of Plekhanov Russian University of Economics., Krasnodar, Russia.

Alexander V. Doroshenko – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor at the Department of the Power Engineering and Pipeline Transport of Energy Carriers of Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

Поступила в редакцию

20 июня 2017 г.

УДК 621.311

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТО-ЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Р.З. Аминов^{1,2}, С.В. Новичков²

¹Саратовский научный центр РАН

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
oepran@inbox.ru, novishkovsv@mail.ru

Резюме: Предложена схема воздушно-аккумулярующей газотурбинной электростанции (ВАГТЭ) с использованием, в период спада электрической нагрузки, абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины (АБХМ) для добавочного охлаждения сжатого воздуха в дополнительном охладителе перед воздушным аккумулятором. Проведен технико-экономический анализ возможных вариантов изменения в составе и длительности работы компрессорного и турбинного оборудования ВАГТЭ в связи с дополнительным снижением температуры сжатого воздуха при использовании АБХМ на 10 – 20 °С. Вариант внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ, при котором профили компрессора и газовой турбины не меняются, а изменяется продолжительность их работы, оказывается более эффективным.

Ключевые слова: воздушно-аккумулярующая газотурбинная электростанция, абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина, воздушный аккумулятор, дополнительная электрическая мощность, чистый дисконтированный доход.

USE OF THE ABSORPTION LITHIUM BROMIDE REFRIGERATING MACHINE FOR INCREASE IN OVERALL PERFORMANCE OF COMPRESSED-AIR POWER STATION

R.Z. Aminov¹, S.V. Novichkov²

¹Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
oepran@inbox.ru, novishkovsv@mail.ru

Abstract: The scheme of compressed-air power plant with use, during recession of electric loading, the absorption lithium bromide refrigerating machine for additional cooling of compressed air in an aftercooler in front of the air accumulator is offered. The technical and economic analysis of possible variants of change in structure and duration of operation of the compressor and turbine equipment of compressed-air power plant in connection with additional decrease in temperature of compressed air when using absorption lithium bromide refrigerating machine by 10 – 20 °C is carried out. The variant of introduction of absorption lithium bromide refrigerating machine in the scheme of compressed-air power plant at which profiles of the compressor and gas turbine don't change and changes the duration of their work, it appears more effective.

Keywords: compressed-air power station, absorption lithium bromide refrigerating machine, compressed air energy storage, electrical capacity, net present value.

Введение

Одним из способов, позволяющих сглаживать неравномерность электропотребления, является производство электроэнергии на основе воздушно-аккумулирующих газотурбинных электростанций (ВАГТЭ). Цикл сжатия здесь протекает отдельно от циклов сжигания топлива и расширения. Энергия, получаемая во внепиковые периоды (ночное время), используется для предварительного сжатия воздуха, который хранится в подземной полости. Существует множество схем установок, в которых аккумулированная энергия в виде сжатого воздуха используется для выработки пиковой энергии [1].

Компрессорная группа ВАГТЭ приводится во вращение электрическим двигателем, потребляющим дешевую ночную электроэнергию. Воздух, предварительно охлажденный циркуляционной водой системы технического водоснабжения, закачивается в воздушный аккумулятор, где он хранится в сжатом виде.

Однако температура сжатого предварительно охлажденного воздуха, направляемого в воздушный аккумулятор, по-прежнему остается достаточно высокой, что приводит к снижению количества закачиваемого в воздушный аккумулятор воздуха и, соответственно, выработке пиковой электроэнергии воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанцией.

Теоретические основы

При закачке воздуха в хранилище постоянного давления ($P=\text{const}$) количество аккумулируемого воздуха определяется следующим образом:

$$G_{\text{ак}} = \frac{V_{\text{хр}}}{\nu}, \quad (1)$$

где $V_{\text{хр}}$ – объем хранилища в конце закачки воздуха, м^3 ; ν – удельный объем закачиваемого воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$.

В расчете на единицу объема хранения, с учетом (1):

$$g_{\text{ак}} = \frac{G_{\text{ак}}}{V_{\text{хр}}} = \frac{1}{\nu} = \rho, \quad (2)$$

где $g_{\text{ак}}$ – удельное количество аккумулируемого воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ – удельная плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Таким образом, удельный объем ν при закачке с постоянным давлением зависит от температуры воздуха; и чем глубже мы его охлаждаем, тем больше будет $G_{\text{ак}}$.

Использование абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины на этапе закачивания сжатого воздуха в воздушный аккумулятор могло бы повысить эффективность работы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции. В абсорбционных агрегатах на бромиде лития в качестве охладителя используется вода, а в качестве абсорбционного материала – водный раствор бромида лития. Этот раствор очень легко вступает в реакцию с водяным паром и, при его наличии, впитывает его до насыщения.

На рис. 1 показана схема воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции с подключением к абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машине. В период спада электрической нагрузки воздух, сжатый компрессорной группой ВАГТЭ 1, 2, 3, предварительно охлажденный в промежуточных охладителях 4, 5, 6, добавочно охлаждают в дополнительно установленном охладителе сжатого воздуха 11, который подключают к испарителю АБХМ 14. Контур нагрева генератора АБХМ 21 подключают на входе и выходе к обратному трубопроводу циркуляционной воды 9. Горячая вода, поступающая в генератор 18, способствует процессу десорбции раствора с выделением водяного пара, который затем поступает в конденсатор АБХМ 19. Из конденсатора через дроссельное устройство

конденсат подается в испаритель 14, где за счет его частичного испарения совершается холодильное действие. Пары воды из испарителя поступают в абсорбер 16, где смешиваются с раствором бромистого лития, поступающего из генератора 18, и обогащенный водой раствор снова подается в генератор. Конденсатор АБХМ 19 и абсорбер АБХМ 16 охлаждаются водой из подающего трубопровода циркуляционной воды 8. Добавочно охлажденный, тем самым увеличенный, расход воздуха направляют в воздушный аккумулятор 12.

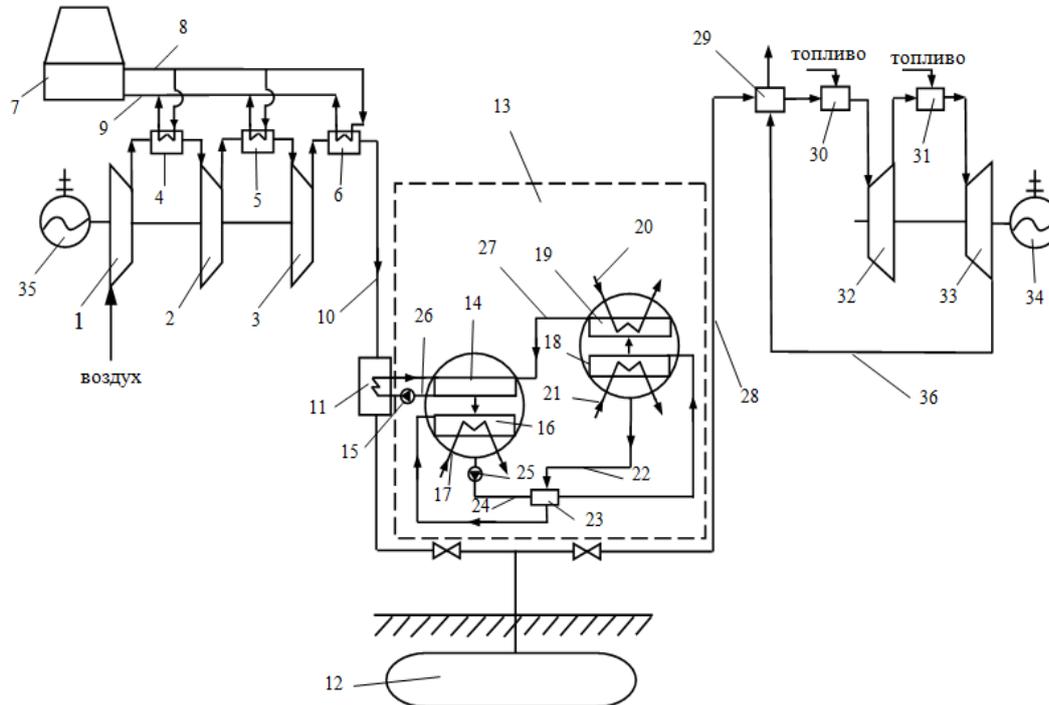


Рис. 1. Схема ВАГТЭ с АБХМ:

1 – компрессор низкого давления; 2 – компрессор среднего давления; 3 – компрессор высокого давления; 4, 5, 6 – промежуточные охладители воздуха; 7 – градирня; 8 – подающий трубопровод циркуляционной воды; 9 – обратный трубопровод циркуляционной воды; 10, 28 – трубопроводы сжатого воздуха; 11 – дополнительный охладитель сжатого воздуха; 12 – воздушный аккумулятор; 13 – абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина (АБХМ); 14 – испаритель АБХМ; 15 – насос охлажденной воды; 16 – абсорбер АБХМ; 17 – контур охлаждения абсорбера АБХМ; 18 – генератор АБХМ; 19 – конденсатор АБХМ; 20 – контур охлаждения конденсатора АБХМ; 21 – контур нагрева генератора АБХМ; 22 – трубопровод горячего слабого раствора; 23 – теплообменник; 24 – трубопровод холодного крепкого раствора; 25 – насос абсорбента; 26 – трубопровод охлажденной воды; 27 – трубопровод конденсата; 29 – регенератор; 30 – камера сгорания высокого давления; 31 – камера сгорания низкого давления; 32 – газовая турбина высокого давления; 33 – газовая турбина низкого давления; 34 – электрический генератор; 35 – электрический двигатель; 36 – газоход уходящих газов газовой турбины

В период суточного подъема электрической нагрузки сжатый воздух по трубопроводу 28 направляют к регенератору 29. В камерах сгорания высокого 30 и низкого 31 давлений воздух участвует в окислении топлива, и увеличенный объем продуктов сгорания подают в проточную часть газовых турбин высокого 32 и низкого 33 давлений.

В качестве критериев анализа схемы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции с АБХМ использовались: удельный расход аккумулируемого воздуха $g_{ак}$; электрическая мощность $N_{эл}$.

Количественную оценку выработки энергии на базе аккумулируемого воздуха можно определить на основе удельного отпуска энергии на единицу расхода аккумулированного воздуха e , (кВт·ч/кг):

$$e = \frac{\mathcal{E}_{\text{ГТ}} - \mathcal{E}_{\text{к}}}{G_{\text{ак}}}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ГТ}}$ – часовой отпуск электроэнергии газовой турбиной в процессе разрядки ВАГТЭ, кВт·ч; $\mathcal{E}_{\text{к}}$ – потребление электроэнергии компрессором в процессе зарядки ВАГТЭ, кВт·ч; $G_{\text{ак}}$ – количество аккумулируемого воздуха за один суточный цикл, кг.

Увеличение количества аккумулируемого воздуха приведет к увеличению мощности компрессора и потребления электроэнергии на его привод, росту расхода топлива в камеры сгорания газовой турбины и потребует рассмотреть ряд изменений по составу и длительности работы компрессорного и турбинного оборудования ВАГТЭ. Можно представить следующие варианты изменений:

1) профили компрессора и газовой турбины остаются неизменными, но увеличивается время работы в режимах зарядки и разрядки;

2) профиль компрессора меняется, профиль газовой турбины не меняется, время работы в режиме зарядки сохраняется постоянным, в режиме разрядки – увеличивается;

3) профили компрессора и газовой турбины меняются, время работы в режимах зарядки и разрядки остаются без изменений.

Увеличение подачи аккумулируемого воздуха при неизменном профиле компрессора или газовой турбины потребует большего времени на работу ВАГТЭ в соответствующем режиме.

Экономическая целесообразность использования абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины в схеме ВАГТЭ определяется стоимостью дополнительной электрической мощности, получаемой в газовой турбине в период суточного подъема электрической нагрузки. В денежном выражении эффективность дополнительной выработки электроэнергии определяется с помощью прироста чистого дисконтированного дохода ($\Delta\text{ЧДД}$), который для представленных вариантов будет иметь следующий вид:

1) для варианта сохранения профилей компрессора и газовой турбины:

$$\Delta\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta R_t - \Delta Z_{m_t} - \Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}) \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^T K_{\text{сумт}} \cdot \alpha_t; \quad (4)$$

2) для варианта изменения профиля компрессора и сохранения профиля газовой турбины:

$$\Delta\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta R_t - \Delta Z_{m_t} - \Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}) \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^T (K_{\text{сумт}} + \Delta K_{\text{комт}}) \cdot \alpha_t; \quad (5)$$

3) для варианта изменения профилей компрессора и газовой турбины:

$$\Delta\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta R_t - \Delta Z_{\text{ГТ}} - \Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}) \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^T (K_{\text{сумт}} + \Delta K_{\text{комт}} + \Delta K_{\text{ГТ}}) \cdot \alpha_t, \quad (6)$$

где T – горизонт расчета; t – шаг расчета; ΔR_t – прирост дохода от реализации электроэнергии, дополнительно вырабатываемой за счет использования АБХМ в схеме ВАГТЭ, на t шаге расчета, млн.руб. в год; $\Delta Z_{\text{ГТ}}$ – прирост затрат на дополнительное топливо, подаваемое в камеры сгорания газовой турбины на t -м шаге расчета, млн руб. в год; $\Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}$ – прирост затрат электроэнергии на привод компрессора, на t -м шаге расчета, млн руб. в год; $K_{\text{сумт}}$ – суммарные капиталовложения в связи с установкой АБХМ на промышленной площадке ВАГТЭ на t -м шаге расчета, млн руб. в год; $\Delta K_{\text{комт}}$ – прирост капиталовложений при изменении профиля компрессора, млн руб. в год; $\Delta K_{\text{ГТ}}$ – прирост капиталовложений при изменении профиля газовой турбины, млн руб. в год; α_t – коэффициент дисконтирования на t -м шаге расчета.

Прирост дохода от реализации дополнительно вырабатываемой электроэнергии ВАГТЭ на t -м шаге расчета можно представить в следующем виде:

$$\Delta R_t = \mathcal{E}_{\text{выпр}t} \cdot (1 - \beta_{\text{сн}})_t \cdot T_{\text{пт}}, \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{выпр}t}$ – количество дополнительно вырабатываемой электроэнергии на t -м шаге расчета, кВт·ч/год; $T_{\text{пт}}$ – тариф на отпускаемую пиковую электроэнергию, руб/ кВт·ч; $\beta_{\text{сн}}$ – доля электроэнергии, расходуемая на собственные нужды.

Количество дополнительно выработанной электроэнергии ВАГТЭ:

$$\mathcal{E}_{\text{выпр}t} = \sum_{i=1}^I \Delta N_{\text{сут}i} \cdot n_{\text{сут}} \cdot \tau_{\text{рт}}, \quad (8)$$

где $\Delta N_{\text{сут}i}$ – дополнительная электрическая мощность ВАГТЭ на t -м шаге расчета, кВт; $\tau_{\text{рт}}$ – время работы ВАГТЭ в режиме разрядки, ч/сут; $n_{\text{сут}}$ – количество рабочих суток ВАГТЭ в году, сут/год.

Прирост затрат электроэнергии на привод компрессора

$$\Delta \mathcal{E}_{\mathcal{E}t} = \Delta N_{\text{ком}t} \cdot n_{\text{сут}} \cdot \tau_{\mathcal{E}t} \cdot T_{\text{нт}}, \quad (9)$$

где $\Delta N_{\text{ком}t}$ – дополнительная мощность потребляемая компрессором на t -м шаге расчета, кВт; $\tau_{\mathcal{E}t}$ – время работы ВАГТЭ в режиме зарядки, ч/сут; $T_{\text{нт}}$ – тариф за потребление ночной электроэнергии, руб/ кВт·ч;

Капиталовложения в связи с установкой АБХМ на промышленной площадке ВАГТЭ определяются следующим образом:

$$K_{\text{сум}t} = K_{\text{абхм}t} + K_{\text{доп.охл}t} + K_{\text{доп.град}t}, \quad (10)$$

где $K_{\text{абхм}t}$ – капиталовложения в оборудование АБХМ на t -м шаге расчета, млн.руб; $K_{\text{доп.охл}t}$ – капиталовложения в дополнительный охладитель сжатого воздуха на t -м шаге расчета, млн. руб; $K_{\text{доп.град}t}$ – капиталовложения в реконструкцию градирни, в связи с увеличением поверхности теплообмена для возросшего количества охлаждающей воды, направляемой в контуры охлаждения абсорбера и конденсатора АБХМ на t -м шаге расчета, млн. руб.

Результаты

Расчеты схемы ВАГТЭ с АБХМ проводились для следующих исходных условий. В состав ВАГТЭ входит воздушный аккумулятор постоянного давления, в который подается воздух с давлением 6,6 МПа. Давление воздуха перед камерой сгорания высокого давления составляет 5,5 МПа; температура воздуха после регенератора – 250°C; температура продуктов сгорания перед газовой турбиной принята 1300 °С. Температура сжатого воздуха перед дополнительным охладителем – 40 °С. Электрическая мощность компрессора в режиме зарядки составила 82,63 МВт, электрическая мощность газовой турбины в режиме разрядки – 202,28 МВт. Время работы ВАГТЭ в режиме зарядки и разрядки принято одинаковым – 4 ч/сут. Удельный отпуск энергии на единицу расхода аккумулированного воздуха, рассчитанный по формуле (3), составил 0,222 кВт·ч/кг. Выработка электрической энергии ВАГТЭ составила 478,6 МВт·ч/сут. Плотность воздуха при изменении давления рассчитывалась с использованием уравнения Ван-дер-Ваальса.

Далее были проведены расчеты по определению изменений показателей работы ВАГТЭ с АБХМ при варьировании температуры сжатого воздуха, добавочно охлажденного после дополнительного охладителя сжатого воздуха.

В табл. 1 представлены технико-экономические показатели оборудования ВАГТЭ с АБХМ при различных значениях температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя перед воздушным аккумулятором ($t_{\text{доб}}$).

Из табл. 1 видно, что добавочное снижение температуры сжатого воздуха перед воздушным аккумулятором до 30–20°C, по сравнению с исходным вариантом, когда температура сжатого воздуха составляла 40°C, приводит к увеличению расхода закачиваемого воздуха, соответственно, на 22896–45792 кг/сут. Это, в свою очередь,

сопровождается как дополнительной выработкой электроэнергии ВАГТЭ на 5073,13–10146,26 кВт·ч/сут, так и увеличением расхода топлива в камеру сгорания газовой турбины на 817,15–1634,3 кг/сут.

Таблица 1

Технико-экономические показатели оборудования ВАГТЭ с АБХМ при различных значениях температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя

Показатель	Температура сжатого воздуха, добавочно охлажденного после дополнительного охладителя сжатого воздуха, °С		
	30	25	20
Удельный расход аккумулируемого воздуха, $g_{ак}$, кг/м ³ (по ф-ле (2))	0,2052	0,2062	0,2071
Дополнительная выработка электроэнергии, кВт·ч/сут (по ф-ле (8))	5073,13	7609,7	10146,26
Увеличение расхода закачиваемого воздуха, кг/сут	22896	34344	45792
Увеличение расхода топлива в камеры сгорания газовой турбины, кг/сут	817,15	1225,73	1634,3
Капиталовложения в связи с установкой АБХМ на промышленной площадке ВАГТЭ, млн. руб. (по ф-ле (10))	35,45	53,18	70,98
Капиталовложения в компрессор, млн. руб.	2004,2	2017,7	2025,2
Увеличение капиталовложений в новый профиль компрессора, млн. руб	21,02	31,53	42,043
Капиталовложения в газовую турбину, млн. руб.	3066,38	3082,5	3098,55
Увеличение капиталовложений в новый профиль газовой турбины, млн. руб	32,16	48,24	64,32

В случае изменения профилей компрессора и газовой турбины дополнительные капиталовложения составят, для принятых ценовых данных, в компрессор 21,02÷42,043, в газовую турбину – 32,16÷64,32 млн. руб. Удельные капиталовложения в компрессор для ВАГТЭ приняты на уровне 400, в газовую турбину – 250 долл/кВт, исходя из общей стоимости турбомашин одного из проектов ВАГТЭ [1].

В табл. 2 представлены изменения параметров АБХМ в составе ВАГТЭ при понижении температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя, подключенного к испарителю АБХМ, с 30 до 20°С. Температура сжатого воздуха перед дополнительным охладителем в исходном варианте составляет 40°С.

Таблица 2

Параметры АБХМ в составе ВАГТЭ при понижении температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя

Параметры АБХМ в составе ВАГТЭ	Температура сжатого воздуха, добавочно охлажденного после дополнительного охладителя сжатого воздуха, °С		
	30	25	20
Холодопроизводительность АБХМ, кВт	1477,35	2216,03	2954,7
Холодильный коэффициент	0,916	0,897	0,875
Суммарная поверхность АБХМ, м ²	738,22	1132,8	1574,11
Поверхность дополнительного охладителя сжатого воздуха, м ²	409,61	486,91	546,14

Увеличение глубины охлаждения сжатого воздуха с 30 до 20°С сопровождается двукратным ростом холодопроизводительности АБХМ, суммарная поверхность теплообмена АБХМ возрастает более чем в 2 раза – на 835,9 м². Здесь необходимо отметить, что при расчете поверхностей теплообмена АБХМ приняты следующие значения

коэффициентов теплопередачи K : в испарителе $K_{и} = 1500$; в генераторе $K_{г} = 700$; в конденсаторе $K_{к} = 1200$; в абсорбере $K_{аб} = 800$ [2].

Расчет величины суммарных капиталовложений АБХМ выполнен исходя из удельной стоимости (включая все составляющие формулы (10)) на единицу холодопроизводительности – 400 долл/кВт, укрупнено принятой по данным фирмы *Lessar*.

Расчеты экономической эффективности, с использованием критерия ЧДД и других интегральных показателей экономической эффективности, проводились по формулам (4) – (6) для горизонта расчета 25 лет и при следующих соотношениях тарифов на пиковую и ночную электроэнергию:

$$T' = \frac{T_{д}}{T_{н}} = 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5. \quad (11)$$

В качестве исходного значения для тарифа на пиковую электроэнергию принято значение $T_{п} = 2,25$ руб/кВт·ч, для ночного тарифа – $T_{н} = 1,5$ руб/кВт·ч.

Для принятых исходных данных варианты ВАГТЭ, связанные с изменениями профилей компрессора и газовой турбины, сопровождаются значительными капиталовложениями, что приводит к отрицательной величине прироста ЧДД от внедрения АБХМ в схеме ВАГТЭ.

В табл. 3 представлены технико-экономические показатели от внедрения АБХМ в схеме ВАГТЭ для варианта сохранения профилей компрессора и газовой турбины при увеличении времени работы в режимах зарядки и разрядки. Данный расчет выполнен при соотношении тарифов на пиковую и ночную электроэнергию $T' = 3$ и для температуры сжатого воздуха 20°C , добавочно охлажденной после дополнительного охладителя сжатого воздуха. Как видно из табл. 3, снижение температуры сжатого воздуха при использовании АБХМ на 20°C позволяет дополнительно закачать его в воздушный аккумулятор в количестве 45792 кг/сут. Использование этого количества сжатого воздуха в часы пика электрической нагрузки позволит дополнительно выработать 10146,26 кВт·ч/сут, по сравнению с вариантом без добавочного охлаждения сжатого воздуха с использованием АБХМ. И, кроме этого, увеличится расход топлива, подаваемый в камеры сгорания газовой турбины, на 571,62 т/год. Пропуск данного дополнительного количества сжатого воздуха, при неизменных профилях проточных частей компрессора и газовой турбины, потребует увеличить время работы в режимах зарядки и разрядки на 0,085 ч/сут. Дополнительные капиталовложения в АБХМ, дополнительный охладитель сжатого воздуха и в реконструкцию градирни составят 70,9128 млн руб. В целом прирост чистого дисконтированного дохода, для принятого горизонта расчета, составит 10,745 млн. руб, а себестоимость дополнительно выработанной электроэнергии – 0,59 руб/кВт·ч.

На рис. 2 показана динамика изменения прироста ЧДД от внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ для варианта постоянных профилей компрессора и газовой турбины при различных соотношениях тарифов на пиковую и ночную электроэнергию. При T' от 1,5 до 2,5 наблюдаются отрицательные значения прироста ЧДД. При увеличении соотношения тарифов T' до 3 и 3,5 Δ ЧДД становится положительным и возрастает в 3,03 раза для всех температур добавочно охлажденного воздуха $t_{доб}^{вых}$.

Технико-экономические показатели от внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ для варианта сохранения профилей компрессора и газовой турбины при $T' = 3$

Показатель	Единица измерения	Значение
Температура после добавочного охладителя	°С	20
Дополнительное количество закачиваемого воздуха	кг/сут	45792
Дополнительная выработка электрической энергии по сравнению с вариантом без АБХМ	кВт·ч/сут	10146,26
Увеличение расхода условного топлива	тут/год	571,62
Затраты на дополнительное топливо	млн.руб/год	1,715
Дополнительные затраты на привод компрессора	млн.руб/год	3,153
Увеличение времени работы	ч/сут	0,085
Капиталовложения в АБХМ	млн.руб	70,9128
Прирост дохода в 1-й год эксплуатации АБХМ	млн.руб/год	12,971
Δ ЧДД	млн.руб	10,745
ИД	руб/руб	0,15
ВНД	-	0,12
Себестоимость дополнительно выработанной электроэнергии	руб/кВт·ч	0,59

Для всего диапазона охлаждения сжатого воздуха от 30 до 20 °С прирост ЧДД (по сравнению с исходным вариантом, когда температура сжатого воздуха составляла 40°С) возрастает в 2 раза при каждом из соотношений тарифов на пиковую и ночную электроэнергию $T' = 3; 3,5$.

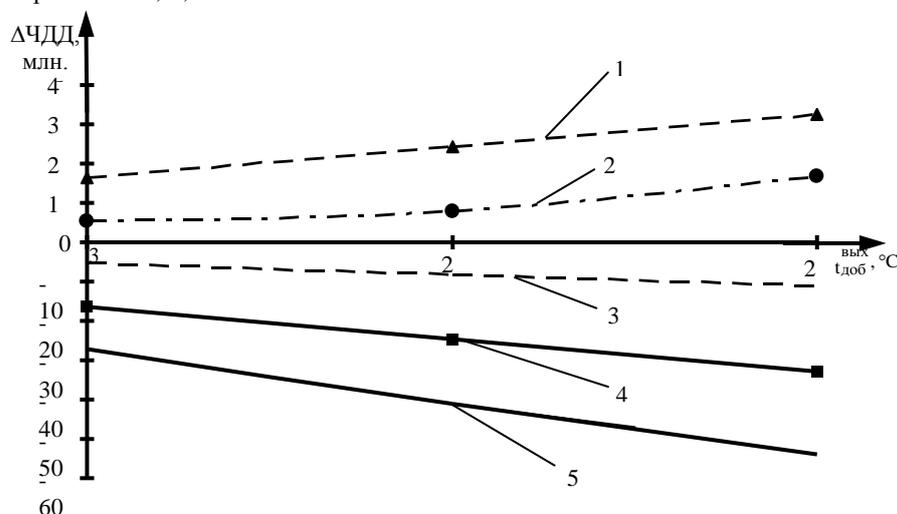


Рис. 2. Изменение прироста ЧДД от внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ для варианта постоянных профилей компрессора и газовой турбины при T' : 1– 3,5; 2 –3,0; 3 – 2,5; 4 –2,0; 5 –1,5

Заключение

1. Предложена схема воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции с использованием в период спада электрической нагрузки абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) для добавочного охлаждения сжатого воздуха в дополнительном охладителе перед воздушным аккумулятором.

2. Проведенный предварительный технико-экономический анализ возможных вариантов изменения в составе и длительности работы компрессорного и турбинного оборудования ВАГТЭ в связи с дополнительным снижением температуры сжатого воздуха при использовании АБХМ на 10–20°C показал следующее. Для принятых исходных данных варианты ВАГТЭ, связанные с изменениями профилей компрессора и газовой турбины, сопровождаются дополнительными капиталовложениями и по этой причине оказываются менее эффективными. Вариант с установкой АБХМ в схему ВАГТЭ, при котором профили компрессора и газовой турбины не меняются, а изменяется лишь продолжительность их работы, могут сопровождаться увеличением прироста ЧДД во всем диапазоне охлаждения сжатого воздуха при соотношении тарифов на пиковую и ночную электроэнергию $T^v = 3 \div 3,5$.

Литература

1. Ольховский Г.Г. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) / Г.Г. Ольховский, В.А. Казарян, А.Я. Столяревский М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 358 с.
2. Абсорбционные преобразователи теплоты: монография / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотов, А.В. Попов. СПб.: СПбГУНИПТ, 2005. 338 с.
3. Патент № 2529615 РФ, МПК F 01K 25/06. Способ аккумулирования энергии / А.Я. Столяревский. № 2013128027/06; заявл. 20.06.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
4. Патент № 2574105 РФ, МПК F01K 3/00. Способ и система для улавливания тепловой энергии в системе производства электроэнергии (варианты) / Анихинди Санджай, Косамана Бхаскара. № 2011143463/06; заявл. 28.10.2011; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.
5. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения её энергетической эффективности / В.Н. Романюк и др. // Энергия и менеджмент. 2013. № 1. С. 15–20.
6. Анализ COP термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой абсорбцией при получении отрицательных температур охлаждения / К.И. Степанов и др. // Вестник МАХ. 2016. № 1. С. 86–92.
7. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and caverns based on the Huntorf CAES plant / Ch. Guo, L. Pan, K. Zhang, C.M. Oldenburg, C. Li, Y. Li // Applied Energy. 2016. 181(1). P. 342–356; doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.105.
8. Exergy and Exergoeconomic Model of a Ground-Based CAES Plant for Peak-Load Energy Production / F. Buffa, S. Kemble, G. Manfrida, A. Milazzo // Energies. 2013. № 6 (2). P. 1050–1067; doi: 10.3390/en6021050.
9. Modelling and analysis of a novel compressed air energy storage system for trigeneration based on electrical energy peak load shifting / S. Lv, W. He, A. Zhang, G. Li, B. Luo, X. Liu // Energy Conversion and Management. 2017. 135 (1). P. 394–401; doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.089.
10. Y. Mazloun. Dynamic modeling and simulation of an Isobaric Adiabatic Compressed Air Energy Storage (IA-CAES) system / Y. Mazloun, H. Sayah, M. Nemer // Journal of Energy Storage. 2017. 11. P. 178–190; doi.org/10.1016/j.est.2017.03.006.
11. Analysis and optimization of a compressed air energy storage – combined cycle system / W. Liu, L. Liu, L. Zhou, J. Huang, Y. Zhang, G. Xu, Y. Yang // Entropy. 2014. 16 (6). P. 3103–3120; doi: 10.3390/e16063103.
12. Energetic and Exergetic Analysis of some Models of Vapor Absorption Chillers Using Lithium Bromide and Water / Mohd Mairaj, Suhail. A. Siddiqui, Adnan Hafiz // Journal of Basic and Applied Engineering Research. 2015. 2 (4). P. 326–329.
13. Energetic analysis of single stage lithium bromide water absorption refrigeration system / Haresh A. Patel, L.N. Patel, Darshan Jani, Amit Christian // Procedia Technology. 2016. 23. P. 488–495; doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.054.

Авторы публикации

Аминов Рашид Зарифович – д-р техн. наук, профессор, руководитель Отдел энергетических проблем Саратовского научного центра (ОЭП СНЦ РАН) Профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» им. А.И. Андрущенко Саратовского государственного технологического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. E-mail: oepran@inbox.ru.

Новичков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» им. А.И. Андрущенко Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. E-mail: novishkovsv@mail.ru.

References

1. Ol'khovskii G.G. Vozdushno-akkumuliruyushchie gazoturbinnnye elektrostantsii (VAGTE) / G.G. Ol'khovskii, V.A. Kazaryan, A.Ya. Stolyarevskii M.: RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2011. 358 p.
2. Absorbtsionnye preobrazovateli teploty: monografiya / A.V. Baranenko, L.S. Timofeevskii, A.G. Dolotov, A.V. Popov. Spb.: SPbGUNIPT, 2005. 338 p.
3. Patent № 2529615 RF MPK F 01K 25/06. Sposob akkumulirovaniya energii / A.Ya. Stolyarevskii – № 2013128027/06; zayavl. 20.06.2013; opubl. 27.09.2014 Byul. No. 27.
4. Patent № 2574105 RF MPK F01K 3/00. Sposob i sistema dlya ulavlivaniya teplovoi energii v sisteme proizvodstva elektroenergii (varianty) / Anikhindi Sandzhai, Kosamana Bkhaskara. № 2011143463/06; zayavl. 28.10.2011; opubl. 10.09.2016 Byul. No. 25.
5. Absorbtsionnye teplovye nasosy v teplovoi skheme TETs dlya povysheniya ee energeticheskoi effektivnosti / Romanyuk V.N. [i dr.] // Energiya i menedzhment. 2013. No. 1. P. 15–20.
6. Analiz COP termodinamicheskogo tsikla ABKhM s dvukhstupenchatoi absorbtsiei pri poluchenii otritsatel'nykh temperatur okhlazhdeniya / Stepanov K.I. [i dr.] // Vestnik MAKh. 2016. No. 1. P. 86–92.
7. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and caverns based on the Huntorf CAES plant / Ch. Guo, L. Pan, K. Zhang, C.M. Oldenburg, C. Li, Y. Li // Applied Energy. 2016. 181(1). P. 342–356; doi.org /10.1016/j.apenergy. 2016.08.105
8. Exergy and Exergoeconomic Model of a Ground-Based CAES Plant for Peak-Load Energy Production / F. Buffa, S. Kemble, G. Manfrida, A. Milazzo // Energies. 2013. No. 6 (2). P. 1050–1067; doi: 10.3390/en6021050.
8. Modelling and analysis of a novel compressed air energy storage system for trigeneration based on electrical energy peak load shifting / S. Lv, W. He, A. Zhang, G. Li, B. Luo, X. Liu // Energy Conversion and Management. 2017. 135 (1). P. 394–401; doi.org/10.1016/j.enconman. 2016.12.089.
9. Y. Mazloun. Dynamic modeling and simulation of an Isobaric Adiabatic Compressed Air Energy Storage (IA-CAES) system / Y. Mazloun, H. Sayah, M. Nemer // Journal of Energy Storage. 2017. 11. P. 178–190; doi.org / 10.1016/j.est.2017.03.006.
10. Analysis and optimization of a compressed air energy storage – combined cycle system / W. Liu, L. Liu, L. Zhou, J. Huang, Y. Zhang, G. Xu, Y. Yang // Entropy. 2014. 16 (6). P. 3103–3120; doi: 10.3390/e16063103.
11. Energetic and Exergetic Analysis of some Models of Vapor Absorption Chillers Using Lithium Bromide and Water / Mohd Mairaj, Suhail. A. Siddiqui, Adnan Hafiz // Journal of Basic and Applied Engineering Research. 2015. 2 (4). P. 326–329.
12. Energetic analysis of single stage lithium bromide water absorption refrigeration system / Haresh A.Patel, L.N.Patel, Darshan Jani, Amit Christian // Procedia Technology. 2016. 23. P. 488–495; doi.org /10.1016/j.protcy.2016.03.054.

Authors of the publication

Rashid Z. Aminov –Prof. head of Department of power problems of the Saratov Scientific center of the Russian Academy of Sciences. E-mail: oepran@inbox.ru.

Sergey V. Novichkov – Cand. Sci. (Tech.), senior lecturer. A.I. Andryushchenko Chair «Thermal and Nuclear

© Р.З. Аминов, С.В. Новичков

Power Plant» of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. E-mail: novishkovsv@mail.ru

Дата поступления

11 июля 2017 г.

УДК 621.311

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

Г.П. Муссонов, А.С. Селезнев, В.В. Федчишин

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
seleznevas.ru@mail.ru

Резюме: В работе обоснована актуальность повышения точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах. Показана необходимость учёта нелинейного характера изменения индуктивности цепи для увеличения точности определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в первичной цепи. Описаны быстродействующие алгоритмы точного определения значений гармонических составляющих. Представлены результаты натурных испытаний с использованием предлагаемых методов. Выполнено сравнение приведённых алгоритмов обработки вторичных сигналов.

Ключевые слова: гармоническая составляющая; гармонический состав сигнала; частотный спектр; нелинейная индуктивность; индуктивное сопротивление.

INCREASE THE ACCURACY OF DETERMINING THE VALUES OF HARMONIC COMPONENTS IN ELECTRICAL SIGNALS

G.P. Mussonov¹, A.S. Seleznev², V.V. Fedchishin³

^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
seleznevas.ru@mail.ru

Abstract: In the work, the urgency of increasing the accuracy of determining the values of the harmonic components in electrical signals is substantiated. It is shown that it is necessary to take into account the nonlinear character of the change in the circuit inductance to increase the accuracy of determining the amplitude and / or effective values of the higher harmonic components in the primary circuit. Fast-acting algorithms for the accurate determination of the values of harmonic components are described. Results of full-scale tests using the proposed methods are presented. Comparison of the above algorithms for processing secondary signals is performed.

Keywords: harmonic components; harmonic composition of the signal; frequency spectrum; nonlinear inductance; inductive resistance.

Рост числа и мощности нелинейных нагрузок в электроэнергетических системах (ЭЭС) обостряет проблему ликвидации гармонических составляющих в токе и напряжении, то есть в электрических сигналах. Гармонические составляющие ухудшают характеристики надёжности основных элементов силового оборудования ЭЭС, негативно влияют на устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, что приводит к сбоям электроснабжения с последующими экономическими издержками [1–4].

С учётом физической природы и специфики к причинам появления гармонических

составляющих относят две основные группы [5, с. 7 и далее]. Первая группа обусловлена режимами работы ЭЭС, то есть перегрузками, аварийными режимами (короткими замыканиями, перенапряжениями и др.), постоянными коммутациями и пр. Вторая группа вызвана технологическими процессами потребителей и промышленных предприятий с нелинейной нагрузкой, например электродуговыми плавильными заводами, электросварочными установками, полупроводниковыми преобразователями электрических сигналов, электрифицированной железной дорогой и др.

В связи с этим **задача** повышения точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах является актуальной, так как на достоверном выявлении значений гармонических составляющих в электроэнергетике базируются методы диагностики, например электросетевого оборудования, а также способы улучшения качества электрической энергии в системах электроснабжения.

Цель работы заключается в повышении точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах на основе выработки управляющих воздействий для их ликвидации и более точного расчёта необходимой мощности силовых резонансных фильтров.

Снижение уровней гармонических составляющих в электрических сетях является частью общей задачи как уменьшения влияния коротких замыканий, нелинейных нагрузок и переходных режимов на промышленное оборудование, так и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения потребителей [1, 6, 7]. Для решения этой задачи применяются силовые резонансные фильтры гармонических составляющих разных схем и исполнений для заграднения прохождения токов и/или напряжений этих гармонических составляющих, либо обеспечения поглощения (генерации в противофазе) этих токов и/или напряжений [5–7].

В общем виде, согласно [5, с. 246 и далее], работу активных фильтров гармонических составляющих в ЭЭС представляют двумя этапами. На первом этапе в режиме реального времени определяют частотный состав вредных гармонических составляющих в электрических сетях, например с помощью преобразований Фурье. А на втором этапе изменяют параметры активных фильтров таким образом, чтобы снизить влияние вредных гармонических составляющих (то есть заградить их прохождение, поглотить или сгенерировать в противофазе), амплитудное или действующее значение которых наибольшее [8–10]. Эти же два этапа характерны и для пассивных резонансных фильтров гармонических составляющих. Различие только в том, что этапы разделены во времени. Систематические измерения позволяют накопить достаточную статистику для более точного определения требуемой мощности силовых резонансных фильтров. На основе статистики определяют конкретный состав вредных гармонических составляющих в данной сети – это первый этап, а затем в ней устанавливают фильтры для снижения уровня конкретных выявленных гармоник – это второй этап [1, 11].

На первом этапе используются трансформаторы тока и/или напряжений для того, чтобы снизить промышленные значения тока и/или напряжения до величин, удобных для работы измерительной и регулирующей аппаратуры. На втором этапе индуктивная связь также имеет место быть [12].

Определение значений гармонических составляющих

Из теоретических основ электротехники известно, например [13, с. 123], что индуктивное сопротивление X_L обмотки (катушки, соленоида) индуктивностью L определяется из выражения

$$X_L = \omega L, \quad (1)$$

где X_L – индуктивное сопротивление обмотки, Ом; ω – циклическая (круговая) частота, рад/с; $\omega = 2\pi f$; f – промышленная частота, равная 50 или 60 Гц в зависимости от страны;

π – известная константа, равная отношению длины окружности к её диаметру; L – индуктивность обмотки, Гн.

Согласно выражению (1) в странах с промышленной частотой $f = 60$ Гц индуктивное сопротивление той же обмотки больше. Аналогично, индуктивное сопротивление этой обмотки для гармонических составляющих, например для третьей $f_3 = 150$ Гц, будет в три раза больше, чем для основной частоты f , для пятой – в пять раз больше, и так далее. Таким образом, как на первом, так и на втором этапах работы активных фильтров индуктивное сопротивление обмоток трансформаторов существенно искажает величину амплитуды гармонической составляющей. И компенсация некоторой гармонической составляющей будет выполняться не полностью или не будет выполняться вообще, если искажённая индуктивностью амплитуда этой гармонической составляющей на первом этапе, то есть при её измерении или контроле, не превысит допустимых для компенсации значений. Кроме того, недостоверное определение амплитудного или действующего значения гармонической составляющей может привести к выбору силового резонансного фильтра недостаточной мощности.

Индуктивность обмотки длиной l и площадью поперечного сечения S с общим числом витков N , в соответствии со стр. 247-253 [14], равна

$$L = k\mu_0\mu N^2 S / l = k\mu_0\mu M^2 V, \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от отношения длины l обмотки к диаметру d её витков; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость вещества. Она показывает, во сколько раз магнитная проницаемость материала сердечника больше магнитной проницаемости вакуума; N – число витков обмотки; S – площадь поперечного сечения обмотки, м²; l – длина обмотки, м; $M = N/l$ – число витков на единицу длины, м⁻¹; $V = Sl$ – объем обмотки, м³.

Из выражения (2) видно, что индуктивность обмотки зависит только от относительной магнитной проницаемости μ материала её сердечника, которая изменяется от протекающего по обмотке тока, в то время как все остальные параметры конкретной обмотки определяют её геометрию и в процессе эксплуатации остаются практически неизменными.

Выходной сигнал трансформатора – это напряжение $U_{\text{вых}}$, которое на линейном участке кривой намагничивания прямо пропорционально первичному сигналу, то есть изменению напряжения или тока в первичной обмотке, соответственно, для трансформатора напряжения или тока. В общем случае мгновенное значение выходного сигнала представляет собой сумму мгновенных значений всех присутствующих в сигнале гармонических составляющих. При коэффициенте трансформации K (обозначение согласно ГОСТ [15]), например, для понижающего трансформатора тока выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ на вторичной обмотке будет в K раз меньше входного сигнала $I_{\text{вх}}$, то есть $U_{\text{вых}} \sim I_{\text{вх}} / K$, здесь знак \sim означает пропорциональность. При подключении измерительной и/или регулирующей аппаратуры, то есть нагрузки с сопротивлением R , во вторичной цепи для каждой i -й гармонической составляющей потечёт ток, пропорциональный току в первичной обмотке и равный

$$I_{\text{выхи}} = U_{\text{вых}} / (R + X_{Li}) \sim I_{\text{вх}} / K (R + X_{Li}), \quad (3)$$

где $I_{\text{выхи}}$ – ток во вторичной цепи трансформатора для i -й гармонической составляющей, А; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на клеммах вторичной обмотки трансформатора, В; R – сопротивление нагрузки во вторичной цепи трансформатора, Ом; $X_{Li} = \omega_i L$ – индуктивное сопротивление вторичной цепи для i -й гармонической составляющей, $i = 1, 2, \dots$, Ом; $\omega = 2\pi f_i$; f_i – частота

i -й гармонической составляющей, $f_i = if$, f – промышленная частота, Гц; L – индуктивность обмотки, Гн; K – коэффициент трансформации данного трансформатора.

Что касается сопротивления нагрузки R во вторичной цепи трансформатора, то оно известно, так как входное сопротивление измерительной и регулирующей аппаратуры указывается в паспортных данных. А для трансформаторов, согласно ГОСТ 7746-2001 [16, п. 8.2. Правила приёмки. Объем испытаний и проверок, ...], при квалификационных и периодических испытаниях и проверках предписывается проводить «Измерение сопротивления вторичных обмоток постоянному току» [16, п. 23]. Индуктивным сопротивлением измерительной и регулирующей аппаратуры во вторичной цепи можно пренебречь, потому что, во-первых, оно незначительно на фоне обмоток трансформаторов с ферромагнитными сердечниками, во-вторых, измерительная аппаратура – это аналого-цифровые преобразователи для гармонического анализа первичного сигнала, а регулирующая аппаратура – это низковольтные диодные схемы управления, у которых отсутствуют индуктивности на входе.

Зависимость магнитной индукции B от напряжённости магнитного поля H описывается кривой намагничивания, которая для каждого трансформатора известна либо по паспортным данным, либо по марке стали магнитопровода, указываемой в паспорте трансформатора. При цифровой обработке измеренной информации полученную зависимость в виде таблицы записываем в память прибора. Затем с её помощью при каждом измерении величины протекающего по обмотке тока I можно, согласно [13, с. 655], вычислить текущее значение напряжённости поля $H = IN/l_m$, где N и l_m для конкретного трансформатора постоянны и всегда известны (здесь N – число витков обмотки; l_m – длина магнитопровода трансформатора), далее в таблице по вычисленному значению напряжённости H найти значение магнитной индукции B и, наконец, определить величину относительной магнитной проницаемости μ из известного выражения $\mu = B/\mu_0 H$, например [14, с. 205]. Поведение относительной магнитной проницаемости μ при изменении напряжённости поля H для ферромагнетиков описывается кривой Столетова, которая имеет явно нелинейный характер. Следовательно и индуктивность, и индуктивное сопротивление обмотки не будут постоянными, а будут зависеть от величины протекающего по ней тока, кроме того индуктивное сопротивление будет зависеть от номера гармонической составляющей. Однако в любой момент времени у нас есть возможность точно определить значение индуктивного сопротивления обмотки для каждой гармонической составляющей по математическому выражению, аналогичному (1), в котором циклическая (круговая) частота является функцией этой гармонической составляющей.

Ещё одной возможностью определения относительной магнитной проницаемости μ материала сердечника обмотки и её индуктивности является построение вольт-амперной характеристики трансформатора. По физической сущности вольт-амперная характеристика трансформатора и кривая его намагничивания – это одна и та же зависимость поведения ферромагнетиков в магнитном поле. Различие только в названии осей координат и масштабных множителях, вызванных разными единицами измерения [17].

Действительно, согласно [13, с. 651], напряжение U , приложенное к обмотке, связано со значением магнитной индукции B , которую она создаёт, соотношением $B = U / (2^{0,5} \pi f N S_m)$, где B – магнитная индукция обмотки, Т; U – напряжение, приложенное к обмотке, В; f – промышленная частота, Гц; N – число витков обмотки; S_m – сечение магнитопровода, м².

Зависимость напряжённости магнитного поля H от протекающего по обмотке тока I определяется из выражения [13]: $H = IN/l_m$, где H – напряжённость магнитного поля,

A/m ; I – текущее значение тока, А; N – число витков обмотки; l_m – длина магнитопровода трансформатора, м.

Использование вольт-амперной характеристики трансформатора более предпочтительно, так как она, во-первых, отражает все конструктивные особенности данного трансформатора, во-вторых, она сразу позволяет учесть индуктивность обоих обмоток трансформатора и их взаимоиндукцию, а также относительную магнитную проницаемость конкретного материала сердечника со всеми его изменениями при изготовлении и сборке.

Кроме того, построить вольт-амперную характеристику трансформатора можно более точно, так как согласно требованиям ГОСТ 8.217–2003 [18, п. 9.5 Определение погрешности] в эксплуатации должно быть оборудование для поверки трансформаторов тока во всём диапазоне первичных токов. Для увеличения точности построения вольт-амперной характеристики первичный ток изменяется с любым шагом, в том числе делается с более мелким в точках перегиба вольт-амперной характеристики. Полученная таким образом вольт-амперная характеристика трансформатора в виде таблицы записывается в память прибора для последующего использования в работе. Методы восстановления аналитического выражения функции по таблице её значений или вычисления значений функции для промежуточных значений, не приведённых в таблице, известны, например [19, Глава VI. Приближение функций].

Проиллюстрируем работу предлагаемого метода на примере трансформатора тока ТПЛ-10кВ-0,5/10Р-50/5. Зависимость вторичного напряжения от изменения первичного тока для трансформатора тока ТПЛ-10кВ-0,5/10Р-50/5 приведена в двух первых колонках табл. 1.

Таблица 1

Зависимость тока вторичной цепи от номера гармонической составляющей

Первичный ток, А	Вторичное напряжение, В	Индуктивное сопротивление, Ом	Индуктивность, L , $\Gamma \cdot 10^{-2}$	Значение тока вторичной цепи согласно (3) для гармонической составляющей с номером, А						
				1	3	5	7	9	11	13
0,243	2,85	12,391	3,944	0,127	0,060	0,040	0,029	0,023	0,019	0,017
0,250	3,10	12,800	4,074	0,140	0,066	0,043	0,032	0,026	0,021	0,018
0,300	4,15	13,833	4,403	0,174	0,081	0,052	0,039	0,031	0,026	0,022
0,350	5,15	14,714	4,684	0,208	0,095	0,062	0,046	0,036	0,030	0,026
0,400	6,20	15,500	4,934	0,243	0,110	0,071	0,052	0,041	0,034	0,029
0,450	7,30	16,222	5,164	0,278	0,124	0,080	0,059	0,047	0,039	0,033
0,522	8,95	17,146	5,458	0,330	0,146	0,093	0,069	0,054	0,045	0,038
0,718	12,85	17,897	5,697	0,461	0,202	0,129	0,095	0,075	0,062	0,053
0,828	14,65	17,693	5,632	0,529	0,232	0,149	0,109	0,087	0,072	0,061
1,043	17,75	17,018	5,417	0,657	0,291	0,187	0,137	0,109	0,090	0,077
1,250	20,20	16,160	5,144	0,772	0,345	0,222	0,164	0,130	0,108	0,092
1,500	22,35	14,900	4,743	0,898	0,409	0,264	0,196	0,155	0,129	0,110
1,720	23,95	13,924	4,432	1,001	0,463	0,301	0,223	0,177	0,147	0,125
1,960	25,50	13,010	4,141	1,108	0,520	0,340	0,252	0,201	0,167	0,142
2,094	26,20	12,536	3,990	1,163	0,550	0,360	0,268	0,213	0,177	0,151
2,360	27,25	11,746	3,739	1,253	0,602	0,396	0,295	0,236	0,196	0,167
2,900	28,95	10,491	3,339	1,408	0,696	0,462	0,346	0,276	0,230	0,197

Продолжение таблицы 1

3,055	29,45	9,640	3,068	1,499	0,757	0,506	0,380	0,304	0,254	0,218
3,998	30,95	7,741	2,464	1,745	0,932	0,635	0,482	0,388	0,325	0,280
5,090	32,05	6,277	1,998	1,963	1,108	0,772	0,592	0,481	0,404	0,349
5,940	32,65	5,497	1,750	2,107	1,233	0,871	0,674	0,549	0,463	0,401
7,202	33,45	4,645	1,478	2,284	1,398	1,007	0,787	0,646	0,548	0,475
8,040	33,85	4,210	1,340	2,382	1,496	1,090	0,858	0,707	0,601	0,523
9,140	34,35	3,758	1,196	2,497	1,615	1,193	0,946	0,784	0,669	0,584
10,320	34,85	3,377	1,075	2,605	1,731	1,296	1,036	0,863	0,739	0,647
11,360	35,25	3,103	0,988	2,690	1,826	1,382	1,111	0,929	0,799	0,700
12,160	35,55	2,924	0,931	2,751	1,894	1,444	1,167	0,979	0,843	0,741
13,340	35,95	2,695	0,858	2,832	1,988	1,531	1,245	1,050	0,907	0,798
14,210	36,25	2,551	0,812	2,888	2,053	1,593	1,301	1,100	0,952	0,840
15,010	36,45	2,428	0,773	2,933	2,109	1,646	1,350	1,144	0,993	0,877
16,250	36,85	2,268	0,722	3,004	2,193	1,727	1,424	1,212	1,055	0,933
16,900	37,05	2,192	0,698	3,039	2,235	1,768	1,462	1,246	1,086	0,962
17,840	37,25	2,088	0,665	3,082	2,290	1,822	1,513	1,294	1,130	1,003
18,730	37,55	2,005	0,638	3,128	2,345	1,875	1,562	1,339	1,172	1,041
20,300	37,95	1,869	0,595	3,197	2,431	1,962	1,644	1,415	1,242	1,106
21,060	38,25	1,816	0,578	3,237	2,476	2,005	1,684	1,452	1,276	1,138
21,990	38,35	1,744	0,555	3,266	2,518	2,049	1,727	1,492	1,314	1,174
23,360	38,65	1,655	0,527	3,316	2,583	2,115	1,791	1,553	1,371	1,227
24,230	38,90	1,605	0,511	3,352	2,625	2,158	1,832	1,591	1,406	1,260
25,330	39,25	1,550	0,493	3,398	2,679	2,212	1,883	1,639	1,451	1,302
26,180	39,35	1,503	0,478	3,421	2,712	2,247	1,918	1,673	1,483	1,332
27,000	39,55	1,465	0,466	3,450	2,748	2,283	1,953	1,706	1,515	1,362
28,200	39,75	1,410	0,449	3,484	2,794	2,332	2,001	1,752	1,558	1,403
29,100	40,05	1,376	0,438	3,520	2,835	2,372	2,040	1,789	1,593	1,436
30,330	40,25	1,327	0,422	3,553	2,879	2,420	2,087	1,834	1,636	1,477
31,470	40,50	1,287	0,410	3,588	2,922	2,464	2,131	1,877	1,677	1,515
32,000	40,65	1,270	0,404	3,607	2,943	2,486	2,152	1,897	1,696	1,533
33,200	40,85	1,230	0,392	3,637	2,984	2,529	2,195	1,938	1,736	1,571
34,560	41,15	1,191	0,379	3,677	3,032	2,579	2,244	1,986	1,782	1,615
35,040	41,25	1,177	0,375	3,691	3,048	2,597	2,261	2,003	1,797	1,630
36,050	41,45	1,150	0,366	3,718	3,082	2,632	2,297	2,037	1,830	1,662
37,270	41,75	1,120	0,357	3,754	3,125	2,676	2,340	2,079	1,870	1,700
38,410	41,95	1,092	0,348	3,782	3,160	2,713	2,377	2,116	1,906	1,734
38,960	42,05	1,079	0,344	3,795	3,176	2,731	2,395	2,133	1,923	1,750
40,010	42,35	1,058	0,337	3,830	3,214	2,769	2,433	2,169	1,957	1,782
41,000	42,50	1,037	0,330	3,851	3,242	2,799	2,463	2,199	1,986	1,810
43,200	43,10	0,998	0,318	3,919	3,317	2,876	2,538	2,271	2,055	1,876

Продолжение таблицы 1

44,800	43,30	0,967	0,308	3,948	3,357	2,919	2,583	2,316	2,099	1,919
45,780	43,75	0,956	0,304	3,993	3,400	2,960	2,621	2,352	2,133	1,951
48,320	44,15	0,914	0,291	4,045	3,465	3,031	2,693	2,423	2,202	2,018

В третьей колонке табл. 1 приведено значение индуктивного сопротивления цепи, вычисленного по закону Ома, то есть отношение содержимого второй колонки – вторичного напряжения или вторичного сигнала, к содержимому первой колонки – первичному току или первичному сигналу. В четвёртой колонке табл. 1 приведено значение индуктивности, вычисленное для первой или основной гармонической составляющей, то есть при $f_i = 50$ Гц, по выражению, полученному из выражения (1). В табл. 1 для экономии места значение индуктивности приведено увеличенным на два порядка, чтобы избавиться от нулей после запятой. Характер изменения индуктивности повторяет ход изменения относительной магнитной проницаемости μ при изменении напряжённости поля H для материала сердечника данного трансформатора. В табл. 1 приведены значения величины токов во вторичной цепи для нечётных гармонических составляющих только для экономии места. Все рассуждения и приведённые формулы справедливы и для гармонических составляющих с чётными номерами.

Из выражения (3) видно, что ток в цепи для i -й гармонической составляющей уменьшается с ростом номера i -й гармонической составляющей, так как для неё, согласно (1), растёт индуктивное сопротивление X_{Li} . Эта зависимость для гармонических составляющих имеет гиперболический характер, и значение тока (3) стремительно убывает, приближаясь к нулю. Для подтверждения этого утверждения проанализируем изменение величины токов в каждой строке последних семи столбцов табл. 1, где приведены значения токов нечётных гармоник во вторичной цепи. Изменение токов обусловлено только изменением частоты гармонической составляющей по закону $f_i = 50i$, $i = 1, 2, \dots$, здесь i – номер гармонической составляющей при одном и том же напряжении питания этой цепи и при постоянном активном сопротивлении вторичной цепи $R = 10$ Ом. Из анализа данных таблицы видно, что ток в цепи для i -й гармонической составляющей уменьшается с ростом её номера. Величина изменения тока i -й гармонической составляющей зависит от текущего значения первичного сигнала и является нелинейной, так как нелинейно изменяется относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Для иллюстрации этого сравним отношение тока основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей для двух активных сопротивлений вторичной цепи при изменении значения первичного сигнала во всём его диапазоне, взятых из табл. 1. Для экономии места возьмём данные первичного сигнала, равномерно расположенные с шагом примерно через десять ампер. Зависимость отношения тока основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей при разных значениях первичного сигнала приведена в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость отношения тока для основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей при разных значениях первичного сигнала

Первичный сигнал, А		0,25	1,043	10,32	20,3	30,33	40,01	48,32
Отношение тока основной гармонической составляющей к току 13-й гармонической составляющей для активного сопротивления вторичной цепи, Ом	R=8	8,385	9,163	4,562	3,273	2,707	2,402	2,230
	R=10	7,737	8,559	4,029	2,890	2,406	2,149	2,005

Из анализа данных табл. 2 видно, что, во-первых, отношение токов повторяет ход изменения индуктивности цепи, то есть кривую Столетова; во-вторых, при больших первичных токах отношение токов уменьшается из-за насыщения магнитопровода трансформатора, и кривая намагничивания имеет почти линейный характер. Нужно иметь в виду, что в этом случае при больших первичных токах, достигающих аварийных значений, происходит срабатывание релейной защиты, после которого вопросы фильтрации гармонических составляющих теряют актуальность.

Отношение F_i , $i=1, 2, \dots$, тока основной гармонической составляющей к току i -й гармонической составляющей во вторичной цепи характеризует величину искажения значения i -й гармонической составляющей индуктивным характером самой цепи, то есть во сколько раз индуктивность цепи уменьшила амплитудное g_{mi} или действующее g_{di} значение i -й гармонической составляющей по сравнению с основной гармонической составляющей при разных значениях первичного сигнала. Математическое выражение для вычисления отношения F_i тока основной гармонической составляющей к току i -й гармонической составляющей во вторичной цепи следует из выражения (3) и имеет вид:

$$F_i = (R + X_{Li}) / (R + X_{L1}), \quad (4)$$

где F_i – величина искажения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей; R – активное сопротивление цепи, включающей индуктивные элементы, Ом; $X_{Li} = \omega_i L$ – индуктивное сопротивление той же цепи для i -й гармонической составляющей, $i=1, 2, \dots$, Ом; $X_{L1} = \omega_1 L$ – индуктивное сопротивление той же цепи для основной гармонической составляющей, $i=1$, Ом; ω_i – циклическая (круговая) частота для i -й гармонической составляющей, рад/с, $\omega_i = 2\pi f_i$; f_i – частота i -й гармонической составляющей, $f_i = if_1$; f_1 – основная гармоническая составляющая, то есть промышленная частота, Гц; L – текущее значение индуктивности цепи, включающей индуктивные элементы, определённое по предварительно построенной в памяти прибора её зависимости от текущего значения напряжения вторичного сигнала, Гн.

Поэтому для каждой i -й гармонической составляющей перед использованием её измеренного амплитудного g_{mi} значения или измеренного действующего g_{di} значения их необходимо скорректировать в соответствии с величиной её искажения индуктивным характером цепи по математическим выражениям $G_{mi} = F_i g_{mi}$, $G_{di} = F_i g_{di}$, где G_{mi} – скорректированное амплитудное значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B ; F_i – величина искажения значения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей, вычисленная согласно выражения (4); g_{mi} – измеренное амплитудное значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B ; G_{di} – скорректированное действующее значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B ; g_{di} – измеренное действующее значение i -й гармонической составляющей, единицы сигнала A или B .

Повышение быстродействия определения значений гармонических составляющих

Исследования [20] показали, что во вторичной цепи трансформаторов тока величина искажения F_i при любых значениях вторичного сигнала $U_{\text{ввых}}$, соответствующих малым изменениям первичного сигнала, а именно от нуля до значений, не превышающих 10% от максимального паспортного значения, аппроксимируется следующей функциональной зависимостью:

$$F_i = U_{\text{ввых}} (i-1)(0,0201805 - 0,0007046U_{\text{ввых}}) + 0,502443i + 0,497557, \quad (5)$$

где F_i – величина искажения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей; $U_{\text{ввых}}$ – значение текущего напряжения вторичного сигнала, В;

i – номер i -й гармонической составляющей.

Для всех остальных значений текущего напряжения $U_{\text{вых}}$ вторичного сигнала цепей, включающих индуктивные элементы, величина искажения F_i каждой i -й гармонической составляющей относительно основной аппроксимируется следующей функциональной зависимостью:

$$F_i = U_{\text{вых}}(i-1)(0,0007046 U_{\text{вых}} - 0,0201805) + 4,176085i - 3,17609, \quad (6)$$

где F_i – величина искажения каждой i -й гармонической составляющей относительно основной составляющей; $U_{\text{вых}}$ – значение текущего напряжения вторичного сигнала, В; i – номер i -й гармонической составляющей.

Несмотря на кажущую сложность функциональных зависимостей (5) и (6), по сравнению с математическим выражением (4), работать с ними проще, так как не нужно хранить в памяти таблицу зависимости индуктивности цепей от текущего измеренного напряжения вторичного сигнала, а затем, в процессе работы, при каждом измерении вторичного сигнала по этой таблице искать и аппроксимировать промежуточные данные, соответствующие значению индуктивности цепи. Также не нужно хранить значение активного сопротивления цепи R .

Одну величину всё-таки хранить надо – это значение вторичного сигнала, при котором первичный сигнал не превышает 10% от максимального паспортного значения. Для трансформатора тока ТПЛ-10кВ-0,5/10Р-50/5 десять процентов от максимального паспортного значения, то есть от 50 А, составляют 5 А. По данным табл. 1 ближайшее меньшее значение равно 3,998 А, ему соответствует значение вторичного сигнала 32,05 В. Для упрощения возьмём ровно 30,95 В. Если в процессе работы текущее значение вторичного сигнала не превышает 30,95 В, то есть меньше или равно 30,95 В, то величину искажения значения i -й гармонической составляющей вычисляют по зависимости (5). В противном случае – по зависимости (5).

Коэффициенты функциональных зависимостей (5) и (6) получены методом наименьших квадратов. Вычисление коэффициентов зависимостей (5) и (6) состоит из двух шагов. На первом шаге определяют зависимость величины искажения F_i , $i = 1, 2, \dots$ от номера i -й гармонической составляющей, то есть от i , в виде двухпараметрической функции, например, $y = ax + b$ при фиксированном значении вторичного сигнала цепи $U_{\text{вых}}$. Получают семейство функций во всём диапазоне изменения вторичного сигнала цепи $U_{\text{вых}}$. На втором шаге определяют зависимость коэффициентов a и b от вторичного сигнала цепи $U_{\text{вых}}$.

В общем случае для других цепей, имеющих индуктивный характер, эта зависимость может иметь более сложный вид, чем в примере с трансформатором тока, поэтому для аппроксимации зависимости F_i (4) с заданным значением погрешности можно использовать кусочно-функциональный подход.

Для сравнения качества аппроксимации величины искажения для каждой i -й гармонической составляющей, $i = 1, 2, \dots$, для трансформаторов тока в табл. 3 приведены соответствующие данные только для третьей, седьмой и одиннадцатой гармонических составляющих. Выбор этих гармоник сделан исключительно для экономии места. Для интересующихся точностью измерения значений гармонических составляющих авторы могут представить данные по любой гармонической составляющей.

Качество аппроксимации по выражениям (5) и (6) величины искажения по сравнению с точным значением (4)

Вторичное напряжение, В	Значение величины искажения					
	F_3 , вычисленной согласно выражению		F_7 , вычисленной согласно выражению		F_{11} , вычисленной согласно выражению	
	(4)	(5) и (6)	(4)	(5) и (6)	(4)	(5) и (6)
2,85	2,107	2,119	4,320	4,357	6,534	6,594
3,10	2,123	2,129	4,368	4,388	6,614	6,647
4,15	2,161	2,156	4,483	4,469	6,804	6,782
5,15	2,191	2,182	4,572	4,546	6,954	6,911
6,20	2,216	2,206	4,647	4,619	7,078	7,031
7,30	2,237	2,228	4,712	4,685	7,186	7,141
8,95	2,263	2,255	4,790	4,766	7,316	7,276
12,85	2,283	2,290	4,849	4,870	7,415	7,449
14,65	2,278	2,292	4,833	4,876	7,389	7,460
17,75	2,260	2,275	4,779	4,826	7,299	7,376
20,20	2,235	2,244	4,706	4,731	7,177	7,218
22,35	2,197	2,202	4,590	4,607	6,984	7,012
23,95	2,164	2,164	4,492	4,491	6,820	6,819
25,50	2,131	2,120	4,392	4,359	6,654	6,598
26,20	2,113	2,098	4,338	4,293	6,563	6,488
27,25	2,080	2,062	4,241	4,186	6,401	6,311
28,95	2,024	2,002	4,072	4,007	6,120	6,011
29,45	1,982	1,978	3,945	3,934	5,908	5,890
30,95	1,873	1,868	3,618	3,603	5,363	5,339
32,05	1,771	1,763	3,314	3,290	4,856	4,817
32,65	1,709	1,696	3,128	3,087	4,547	4,478
33,45	1,634	1,623	2,903	2,869	4,172	4,115
33,85	1,593	1,589	2,778	2,767	3,963	3,944
34,35	1,546	1,548	2,639	2,644	3,732	3,741
34,85	1,505	1,510	2,515	2,529	3,524	3,548
35,25	1,474	1,480	2,421	2,440	3,368	3,401
35,55	1,452	1,459	2,357	2,377	3,262	3,295
35,95	1,425	1,432	2,274	2,296	3,123	3,161
36,25	1,407	1,413	2,220	2,238	3,033	3,064
36,45	1,391	1,400	2,172	2,201	2,954	3,002
36,85	1,370	1,377	2,109	2,130	2,849	2,883
37,05	1,360	1,365	2,079	2,095	2,798	2,826
37,25	1,345	1,354	2,036	2,062	2,727	2,770
37,55	1,334	1,338	2,002	2,014	2,670	2,691
37,95	1,315	1,318	1,945	1,954	2,575	2,591

Продолжение таблицы 3

38,25	1,307	1,304	1,922	1,912	2,537	2,520
38,35	1,297	1,299	1,891	1,898	2,485	2,497
38,65	1,284	1,286	1,852	1,859	2,420	2,432
38,90	1,277	1,276	1,830	1,828	2,383	2,380
39,25	1,268	1,262	1,805	1,787	2,342	2,312
39,35	1,261	1,259	1,784	1,776	2,307	2,294
39,55	1,256	1,252	1,767	1,755	2,278	2,258
39,75	1,247	1,245	1,741	1,735	2,235	2,225
40,05	1,242	1,235	1,726	1,706	2,210	2,177
40,25	1,234	1,230	1,703	1,689	2,172	2,148
40,50	1,228	1,223	1,684	1,668	2,140	2,113
40,65	1,225	1,219	1,676	1,656	2,127	2,094
40,85	1,219	1,214	1,657	1,642	2,096	2,070
41,15	1,213	1,207	1,638	1,622	2,064	2,036
41,25	1,211	1,205	1,632	1,616	2,053	2,026
41,45	1,206	1,201	1,619	1,604	2,031	2,007
41,75	1,201	1,196	1,604	1,589	2,007	1,981
41,95	1,197	1,193	1,591	1,580	1,985	1,967
42,05	1,195	1,192	1,585	1,576	1,974	1,960
42,35	1,191	1,188	1,574	1,565	1,957	1,942
42,50	1,188	1,187	1,564	1,561	1,939	1,935
43,10	1,181	1,183	1,544	1,549	1,907	1,915
43,30	1,176	1,182	1,529	1,547	1,881	1,911
43,75	1,174	1,182	1,523	1,546	1,872	1,911
44,15	1,167	1,183	1,502	1,550	1,837	1,917

Данные для сравнения качества аппроксимации величины искажения третьей, седьмой и одиннадцатой гармонических составляющих занимают две колонки. В левой колонке представлено точное значение величины искажения, вычисленное по формуле (4), а в правой колонке – аппроксимация точного значения выражениями (5) и (6). Из анализа данных табл. 3 видно, что качество аппроксимации по выражениям (5) и (6) величины искажения F_i , $i = 1, 2, \dots$, по сравнению с точным значением (4) является приемлемым для практического применения. Относительная погрешность аппроксимации в рабочем диапазоне изменения вторичного сигнала для всех гармонических составляющих не превышает 2%. Выражения (5) и (6) позволяют быстро и точно определить величину искажения F_i , $i = 1, 2, \dots$, значений гармонических составляющих в электрических сигналах. При этом использование предлагаемых алгоритмов практически не окажет влияния на быстродействие при решении основной задачи – повышение качества электрических сигналов в системах электроснабжения промышленных предприятий со значительной нелинейной нагрузкой.

Результатом исследования является создание алгоритмов обработки вторичных сигналов, позволяющих увеличить точность измерения значений гармонических составляющих, используемых как в решении задач диагностики электрооборудования, так и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных

предприятий. В последнем случае применение алгоритмов позволяет повысить надёжность и эффективность исключения высокочастотных помех из основных сигналов при обеспечении качества электрической энергии и повысить точность в определении мощности силовых резонансных фильтров.

Блок-схема алгоритма состоит из четырёх последовательно соединённых блоков, которые пронумерованы и приведены ниже. Работа осуществляется следующим образом (порядок действия рассмотрен на примере трансформатора тока).

1. На основной промышленной частоте $f = 50$ Гц строят вольт-амперную характеристику конкретного измерительного трансформатора тока во всём диапазоне первичных токов, то есть зависимость $U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжения вторичного сигнала трансформатора от величины первичного сигнала $I_{\text{ВХ}}$.

2. По данным вольт-амперной характеристики по закону Ома определяют индуктивное сопротивление $X_{L1} = U_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} - R$ и индуктивность $L_1 = X_{L1}/(2\pi f)$ трансформатора тока на промышленной частоте f во всём диапазоне первичных токов с учётом активного сопротивления нагрузки R во вторичной цепи трансформатора.

3. Для каждой i -й гармонической составляющей определяют индуктивное сопротивление $X_{Li} = 2\pi f_i L_i$ и величину её искажения $F_i = (R + X_{Li})/(R + X_{L1})$ индуктивным характером цепи с учётом активного сопротивления нагрузки R во вторичной цепи трансформатора.

4. Перед использованием измеренного амплитудного g_{mi} значения или измеренного действующего g_{di} значения для каждой i -й гармонической составляющей необходимо скорректировать их в соответствии с величиной искажения этой гармонической составляющей индуктивным характером цепи по математическим выражениям $G_{mi} = F_i g_{mi}$, $G_{di} = F_i g_{di}$.

Первые два пункта приведённого алгоритма выполняются снятием характеристик трансформатора, которые затем записываются в память компьютера. Последние два – при подключённом аналого-цифровом преобразователе к вторичной цепи трансформатора и в компьютере, осуществляющем гармонический анализ.

Полученные результаты используются при определении параметров пассивных фильтров. Техническая реализация приведённых алгоритмов осуществляется следующим способом. Вначале в течение длительного времени, с целью исключения случайной ошибки и удовлетворения требований ГОСТ 32144-2013 [2], на реальных линиях измеряется состав гармонических составляющих. Затем, с использованием приведённых в статье алгоритмов корректируются их значения, и полученные более точные значения проверяются на соответствие нормам [2]. Если некоторые гармонические составляющие стабильно превышают значения установленные ГОСТом [2], то в сети устанавливается пассивный фильтр. Сами устанавливаемые фильтры являются фильтрами первого порядка, расчёт которых для конкретной частоты описан в литературе [5; 9; 10].

Для активных фильтров [9], которые в процессе функционирования постоянно анализируют гармонический состав силовых электрических сигналов и подавляют гармонические составляющие, превышающие значения, установленные стандартом [2], коррекция вычисленных с помощью преобразования Фурье значений гармонических составляющих должна осуществляться по алгоритмам, приведённым в пунктах блок-схемы. В активных фильтрах гармонические составляющие генерируются в силовую цепь в противофазе [9]. Поэтому необходимо рассмотренные алгоритмы увеличения точности определения величины гармонических составляющих применить ещё один раз, так как выработанные в противофазе значения гармонических составляющих при их передаче в силовую цепь будут искажены (уменьшены) индуктивностью вторичного трансформатора, и компенсация гармонических составляющих до требований [2] не обеспечится. Также

фактор уменьшения компенсирующего воздействия необходимо учитывать при выборе мощности вторичного трансформатора в активном фильтре.

Исходя из результатов исследования, сформулированы следующие **выводы**:

1. Предлагаемый подход учёта нелинейной индуктивности цепи позволяет увеличить точность определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в первичной, то есть силовой цепи.

2. Увеличение точности определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в первичной цепи позволяет улучшить качество диагностики электросетевого оборудования, более точно выработать величину компенсирующего воздействия и обеспечить необходимую мощность силовых резонансных фильтров.

3. Приведённые в статье материалы подтверждают простоту реализации и высокую точность определения амплитудных и/или действующих значений гармонических составляющих в электрических сигналах как для силовых, так и для компенсирующих цепей.

Литература

1. Селезнев А.С. Снижение уровня высших гармоник в электрических сетях высокого напряжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 4 (87). С. 143–148.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.
3. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 81 с.
4. Ершов М.С., Егоров А.В., Комков А.Н Новый стандарт качества электрической энергии и вопросы регулирования взаимоотношений ее поставщиков и потребителей // Территория Нефтегаз. 2012. № 6. С. 140–146.
5. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
6. Селезнев А.С. Выявление источников искажения формы кривой напряжения в электроэнергетических системах [Электронный ресурс] / Г.С. Кудряшев, А.С. Селезнев, Д.С. Федосов // Машиностроение : сетевой электронный научный журнал. "Russian Internet Journal of Industrial Engineering" (г. Магнитогорск). 2014. № 3. Т. 2. С. 59–65. Режим доступа: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-10.pdf>. Дата обращения: 04.04.2017.
7. Кондрат С.А., Селезнев А.С., Третьяков А.Н. Нормализация несинусоидальных режимов в электрических сетях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 8 (91). С. 155–161.
8. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2006. Vol. 54, No. 3. P. 255–269.
9. Arrillaga J., Watson N.R. Power systems harmonics. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 412 p.
10. Das J.C. Power System Harmonics and Passive Filter Designs. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 873 p.
11. Карташев И.И. [и др.] Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 320 с.
12. Balasubramaniam P.M., Gurusamy G. Evaluation and Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement // International Journal of Electrical Engineering. 2012. Vol. 5, No. 7. P. 829–841.
13. Зевеке Г.В. [и др.] Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 753 с.
14. Калашников С.Г. Электричество. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
15. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. Переиздание март 1983 г. с Изменением № 1, утверждённым в мае 1983 г.; Пост. № 2174 от 06.05.83 (ИУС № 8 – 1983 г.).

16. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 20 от 1 ноября 2001 г.). Введен в действие с 01.01.2003. Пост. № 92-ст от 13.03.2002.
17. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
18. ГОСТ 8.217-2003. Трансформаторы тока. Методика поверки. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 23 от 22 мая 2003 г.). Введен в действие с 01.04.2004. Пост. № 268-ст от 26.09.2003.
19. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций. Киев: Наук. думка, 1987. 288 с.
20. Пат. 2629007 Российская Федерация, МПК7 Н 02 J 3/01. Способ определения значений высших гармонических составляющих в электрических сигналах (варианты) / Г. П. Муссонов, А.С. Селезнев, В.В. Федчишин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ). № 2016122704; заявл. 08.06.2016; опубл. 24.08.2017. Бюл. № 21. 22 с.

Авторы публикации

Муссонов Геннадий Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» института энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). E-mail: genmuss@gmail.com.

Селезнев Алексей Спартакевич – аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы» института энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). E-mail: seleznevas.ru@mail.ru.

Федчишин Вадим Валентинович – канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). E-mail: fedchishin@istu.edu.

References

1. Seleznev A.S. Snizhenie urovnya vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh vysokogo napryazheniya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. No. 4 (87). P. 143–148.
2. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Vved. 2014–07–01. M.: Standartinform, 2014. 36 p.
3. GOST 33073-2014. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Vved. 2015–01–01. M.: Standartinform, 2014. 81 p.
4. Ershov M.S., Egorov A.V., Komkov A.N. Novyi standart kachestva elektricheskoi energii i voprosy regulirovaniya vzaimootnoshenii ee postavshchikov i potrebiteli // Territoriya Neftegaz. 2012. No. 6. P. 140–146.
5. Zhezhenlenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 2000. 331 p.
6. Seleznev A.S. Vyyavlenie istochnikov iskazheniya formy krivoi napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh [Elektronnyi resurs] / G.S. Kudryashev, A.S. Seleznev, D.S. Fedosov // Mashinostroenie : setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal. "Russian Internet Journal of Industrial Engineering" (g. Magnitogorsk). 2014. No. 3. T. 2. P. 59–65. – Rezhim dostupa: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-10.pdf>. Data obrashcheniya: 04.04.2017.
7. Kondrat S.A., Seleznev A.S., Tret'yakov A.N. Normalizatsiya nesinusoidal'nykh rezhimov v

- elektricheskikh setyakh // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. No. 8 (91). P. 155–161.
8. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2006. Vol. 54, No. 3. P. 255–269.
9. Arrillaga J., Watson N.R. Power systems harmonics. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 412 p.
10. Das J.C. Power System Harmonics and Passive Filter Designs. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 873 p.
11. 11.Kartashev I.I. [i dr.] Upravlenie kachestvom elektroenergii / pod red. Yu.V. Sharova; 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2008. 320 p.
12. Balasubramaniam P.M., Gurusamy G. Evaluation and Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement // International Journal of Electrical Engineering. 2012. Vol. 5, No. 7. P. 829–841.
13. Zeveke G.V. [i dr.] Osnovy teorii tsepei. M.: Energiya, 1975. 753 p.
14. Kalashnikov S.G. Elektrichestvo. 6-e izd., stereot. M.: Fizmatlit, 2003. 624 p.
15. GOST 1494-77. Elektrotehnika. Bukvennye oboznacheniya osnovnykh velichin. Pereizdanie mart 1983 g. s Izmeneniyem No. 1, utverzhennym v mae 1983 g.; Post. No. 2174 ot 06.05.83 (IUS No. 8 – 1983 g.).
16. GOST 7746-2001. Transformatory toka. Obschie tekhnicheskie usloviya. Prinyat Mezhsudarstvennym Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol No. 20 ot 1 noyabrya 2001 g.). Vveden v deistvie s 01.01.2003. Post. No. 92-st ot 13.03.2002.
17. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Raschet induktivnosti: spravochnaya kniga. 3-e izd., pererab. i dop. L.: Energoatomizdat, 1986. 488 p.
18. GOST 8.217-2003. Transformatory toka. Metodika poverki. Prinyat Mezhsudarstvennym Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol No. 23 ot 22 maya 2003 g.). Vveden v deistvie s 01.04.2004. Post. No. 268-st ot 26.09.2003.
19. Molchanov I.N. Mashinnye metody resheniya prikladnykh zadach. Algebra, priblizhenie funktsii. Kiev: Nauk. dumka, 1987. 288 p.
20. Pat. 2629007 Rossiiskaya Federatsiya, MPK7 H 02 J 3/01. Sposob opredeleniya znachenii vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v elektricheskikh signalakh (varianty) / G.P. Mussonov, A.S. Seleznev, V.V. Fedchishin; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Irkutskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet» (FGBOU VO IRNITU). – No. 2016122704; zayavl. 08.06.2016; opubl. 24.08.2017. Byul. No. 21. 22 p.

Authors of the publication

Gennadiy P. Mussonov – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department «Electric Power Stations, Networks and Systems», Institute of Power Engineering.

Aleksey S. Seleznev – postgraduate student of department «Electric Power Stations, Networks and Systems», Institute of Power Engineering/

Vadim V. Fedchishin – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof. of department «Electric Power Stations, Networks and Systems», Director of the Institute of Power Engineering, Head of the Department of Electric Power Stations, Networks and Systems.

Поступила в редакцию

20 сентября 2017 г.

АКТИВНОЕ УЧАСТИЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ В УПРАВЛЕНИИ СВОИМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕМ

*В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, В.Б. Шелехова

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6934-0025>; sva@isem.irk.ru

Резюме: Исследования в области анализа, расчета и оптимизации систем активного энергопотребления становятся все более актуальными, а их результаты – все более востребованными. Реализация концепции активного потребителя в интеллектуальной интегрированной энергосистеме представляет собой серьезную научную проблему, нуждающуюся в разработке соответствующего научно-методического инструментария. Определенное развитие этого направления рассматривается в настоящей статье. В ней представлена математическая модель активного потребителя, учитывающая технологические особенности, экономические интересы и релевантность его энергоснабжения. Формулируется комплекс задач оптимального управления нагрузкой активного потребителя (на примере электропотребления) и оптимальной загрузки источников энергии активного потребителя управления генерацией электроэнергии, тепловой энергии и холода с учетом наличия у потребителя нескольких собственных источников энергии. Они относятся к задачам смешанно-целочисленного линейного программирования. Приведена методика проведения вычислений с использованием разработанного методического и программного обеспечения. Исследуются основополагающие функции активного потребителя в интеллектуальной интегрированной энергосистеме в соответствии с его базовыми принципами формирования, связанными с повышением требований по обеспечению комфортных условий и качеству поставляемой энергии, развитием распределенной генерации и участием потребителей не только в получении, но и в поставке энергии в систему.

Ключевые слова: интеллектуальная интегрированная энергосистема, активный потребитель, смешанно-целочисленное линейное программирование, когенерация, управление нагрузкой, выбор источников энергоснабжения.

ACTIVE DEMAND-SIDE MANAGEMENT

*V.A. Stennikov, E.A. Barahtenko, D.V. Sokolov, V.B. Shelekhova

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Abstract: The paper is concerned with the problems of modeling active consumption systems. Active consumption systems were considered in this paper. The implementation of active consumer concept is an important scientific problem, which should be solved with a special tool. A mathematical model of active consumer is presented. It takes into account both economic and energy aspects. The mixed integer linear programming is used to solve the problem of the active consumer demand response. An active consumer demand response problem is investigated by the example of electric power supply. To include different generating capacities, we consider power,

heat and cooling supply systems. For example, a gas firing micro-cogeneration unit, absorption refrigerating machine, coal firing micro-cogeneration unit and a heat energy storage were chosen. Also, the research is focused on the control of electricity, heat and cooling generation in order to take account of consumers self-generating facilities. Additionally, consideration is given to the function of active consumer in the intelligent integrated energy system according to the basic principles of its formation. The computational experiment technology based on the developed methodological software and support is presented.

Keywords: *intelligent integrated energy system, active consumer, mixed-integer linear programming, cogeneration, demand response, choice of energy sources.*

Введение

До последнего времени интеграция систем электро-, тепло- и газоснабжения рассматривалась на уровне источников электроэнергии и тепла – ТЭЦ [1, 2], которые фактически являются связующим звеном между системами энергоснабжения потребителей и производственно-транспортными энергетическими системами. Ситуация в системах энергоснабжения радикальным образом изменилась после появления технологий и экономических механизмов использования потребителями альтернативных возможностей, с одной стороны, генерации и поставки энергии, с другой – активного выбора энергопотребляющих приборов, в частности, централизованного теплоснабжения от ТЭЦ или индивидуального электроотопления, электрических или газовых печей у бытовых потребителей и др. Переход к интеллектуальной энергетике, основой которой является клиентоориентированность, в смысле качественного и эффективного энергоснабжения, обусловил необходимость разработки методического обеспечения для анализа и оптимизации систем активного энергопотребления, что представляет собой актуальную научную проблему, имеющую весомое значение для развития энергетики страны.

Концепция активного потребителя в интеллектуальной энергосистеме

Концепция активного потребителя (далее АП) естественно вписывается в технологию интеллектуальной интегрированной энергосистемы (далее ИИЭС), характеризующуюся следующими принципиальными свойствами [3–6].

- Гибкость – возможность системы адаптироваться под текущий уровень потребления энергии, с учетом изменений температуры наружного воздуха и общих изменений, происходящих в инфраструктурной системе города, а также адекватной реакции на внутренние и внешние воздействия.
- Интеллект – способность системы реагировать на запросы потребителей (снижать или увеличивать выработку энергии).
- Интеграция – способность вписываться в городскую среду как с точки зрения городского планирования местности и размещения объектов энергоснабжения, так и с точки зрения взаимодействия всех систем жизнеобеспечения города (система электро-, тепло- и водоснабжения, канализация, топливоснабжение и т.д.).
- Сетецентричность – наличие возможности управлять энергоснабжением и энергопотреблением на основе разветвленной энергетической сети, в которой каждый элемент системы получает возможность взаимодействовать с любым другим элементом через телекоммуникационную сеть связи, которая становится основой управления.
- Эффективность – соответствие используемого оборудования всем современным требованиям энергетической, экономической, экологической эффективности, при этом максимальная эффективность системы обеспечивается оптимальным сочетанием технологий, включая максимальную эксплуатацию местных энергетических ресурсов.
- Конкурентоспособность – технологическая способность поддерживать экономическую эффективность систем и доступность энергоресурсов для всех категорий потребителей относительно других технологий, при этом потребители имеют возможность управлять своим энергопотреблением для снижения объемов оплаты за него.

• Надежность – возможность противостоять физическим и информационным негативным воздействиям на систему энергоснабжения с быстрым восстановлением (самовосстановлением) ее работы без тотальных отключений и высоких затрат на восстановительные работы.

Эти свойства обеспечиваются в результате реализации следующих основополагающих принципов, присущих ИИЭС.

1. Ориентация на требования конечного потребителя с его ключевой ролью активного участника и субъекта принятия решений путем самостоятельного формирования требований к объему получаемой энергии, качеству и характеру ее потребительских свойств и энергетических услуг, что предполагает переход к концепции активного потребителя как полноправного участника процесса управления энергоснабжением.

2. Повышение наблюдаемости и управляемости как отдельных элементов, так и энергосистемы в целом.

3. Решение задачи оптимального управления функционированием и развитием системы, включая ее отдельные элементы, и информационно-технологическая реализация способов обеспечения требований (ценностей) по качеству, комфорту, надежности, стоимости, формируемых с его стороны.

4. Трансформация информации в главное средство осуществления эффективного мониторинга и управления. Принципиально важным представляется то, что управленческие и информационные связи при этом превращаются в системообразующий фактор, обеспечивающий переход к новому качеству: от энергетической к энергоинформационной сетцентрической системе.

5. Выработка и принятие решений по развитию и функционированию энергосистемы осуществляется на основе соблюдения баланса интересов всех взаимодействующих сторон с учетом ожидаемых ими эффектов.

В ИИЭС конечный потребитель рассматривается в качестве партнера субъектов энергетики в части обеспечения надежной и эффективной работы энергосистемы. Приобретая статус активного участника технологического процесса, он становится одним из основных действующих элементов в энергосистеме.

Активные потребители – это участники энергорынка, обладающие возможностью воздействия на свое энергопотребление и готовностью к участию в процессе управления их спросом. Эти потребители самостоятельно формируют требования к объему получаемой энергии, качеству и характеру ее потребительских свойств и энергетических услуг. Основополагающие функциональные свойства, присущие АП, могут быть сформулированы следующим образом:

– Технологическая возможность управления собственным энергопотреблением за счет наличия: энергопотребляющего оборудования, способного к изменению или перенесению нагрузки во времени; собственных генерирующих мощностей; систем аккумулирования и хранения энергии.

– Осуществление деятельности по управлению спросом, включающей: управление энергопотреблением (снижение или перенесение нагрузки во времени) с целью минимизации затрат на энергопотребление; управление собственными генерирующими мощностями: определение степени их загрузки, объема собственного энергопотребления от них и объема энергии, поставляемого на энергорынок; управление накоплением энергии в системе аккумулирования и хранения энергии.

На основе вышеуказанных положений формируются технологические функции АП в ИИЭС:

– управление собственным энергопотреблением в соответствии с необходимостью, связанной с обеспечением энергией АП и соответствующей оптимизацией своих затрат на энергоснабжение;

– определение условий, при наличии загрузки собственных генерирующих

мощностей, для формирования заявки на участие в покупке/продаже ресурсов/энергии.

Реализация перечисленных функций, в конечном счете, определяет выбор потребителем рациональной стратегии энергоснабжения, ориентированной либо на полное самообеспечение своего энергоснабжения, либо на частичную покупку энергии извне, либо на поставки самостоятельно выработанной энергии в централизованную систему энергоснабжения. В настоящее время в России выполнение функций АП в различных отраслях народного хозяйства очень ограничено. Во многом это связано с отсутствием рынка системных услуг, оказываемых потребителем по снижению нагрузки, отсутствием технической возможности выдачи энергии в централизованную систему от собственных генерирующих мощностей и др. Для ряда отраслей (железнодорожный транспорт, строительство) потенциальные возможности АП отсутствуют как в текущих условиях, так и на перспективу, что обусловлено особенностями технологического процесса этих отраслей.

Моделирование активного потребителя

Энергосистема АП может быть интегрирована с системой топливоснабжения, собственной генерацией энергии на нетрадиционных и возобновляемых источниках энергии, хранилищами энергии и системами централизованного энергоснабжения (рис. 1). Формирование и реализация функций АП требует создания программного и методического обеспечения для определения оптимальной загрузки собственных источников энергии для удовлетворения текущего уровня энергопотребления и создания рационального его поведения как по отношению к собственным источникам энергии, так и централизованным системам, к которым он подключен. К нему предъявляется относительно новый состав функциональных свойств, формируемых интересами АП и реализующих следующие задачи: учет экономических интересов АП; оптимизацию загрузки энергопотребляющих приборов и оборудования АП исходя из прогнозируемых ценовых сигналов энергорынка; рациональное управление выработкой энергии на базе установок собственной генерации. Моделирование этих свойств, способствующих активному поведению потребителей в ИИЭС, позволит обоснованно решать задачу поиска оптимальной стратегии энергоснабжения АП с учетом его энергетических и экономических интересов на рассматриваемом временном горизонте.



Рис. 1. Обобщенная структура энергосистемы АП

Математическая постановка задачи оптимизации загрузки источников энергии активного потребителя в соответствии с его потребностями в энергии

Математическая постановка задачи оптимизации загрузки существующих источников энергии АП, предназначенной для покрытия собственного спроса на энергию, заключается в минимизации суммарных издержек на топливо и содержание источников энергоснабжения

потребителя с учетом выполнения множества технологических ограничений и условий. Заданными являются: временной период $\tau \in [0; \Theta]$; множество источников электроэнергии M ; множество источников тепловой энергии N ; множество источников хладоснабжения D , при этом $N \subset D$; множество ТЭЦ $CHP = (M, N)$; стоимость первичных энергоресурсов, расходуемых для получения электроэнергии $S_{\tau,m}^{\Theta}$, $m \in M$, тепла $S_{\tau,n}^T$, $n \in N$, и холода $S_{\tau,d}^X$, $d \in D$, в период времени τ ; объем спроса на электроэнергию C_{τ}^{Θ} , тепло C_{τ}^T и холод C_{τ}^X в период времени τ ; постоянная часть спроса, которую необходимо удовлетворить в текущий период τ , на электроэнергию $\tilde{C}_{\tau}^{\Theta}$, тепловую энергию \tilde{C}_{τ}^T и холод \tilde{C}_{τ}^X ; переменная часть спроса, которую необходимо удовлетворить на промежутке $\tau = [0; \Theta]$, на электроэнергию \hat{C}_{τ}^{Θ} , тепловую энергию \hat{C}_{τ}^T и холод \hat{C}_{τ}^X ; расстояние от источника электроэнергии l_m^{Θ} , $m \in M$ тепловой энергии l_n^T , $n \in N$ и хладоснабжения l_d^X , $d \in D$.

В результате решения поставленной задачи необходимо определить: структуру и объемы генерации электроэнергии $w = (w_1, \dots, w_m)^T$; объем генерации тепла $h = (h_1, \dots, h_n)^T$; объем генерации холода $q = (q_1, \dots, q_d)^T$. Ее математическая формулировка записывается в следующем виде.

Требуется минимизировать функцию общих затрат на функционирование системы энергоснабжения АП, имеющую следующий вид:

$$Z(w, h, q) = \sum_{\tau=0}^{\Theta} \left(\sum_{m=1}^M \alpha_m E_m^{\Theta} + \sum_{n=1}^N \beta_n E_n^T + \sum_{d=1}^D \gamma_d E_d^X \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\alpha_m = (\alpha_1, \dots, \alpha_M)^T, \quad \alpha_m \in \{0, 1\}, \quad \beta_n = (\beta_1, \dots, \beta_N)^T, \quad \beta_n \in \{0, 1\}, \quad \gamma_d = (\gamma_1, \dots, \gamma_D)^T, \\ \gamma_d \in \{0, 1\}, \quad w = (w_1, \dots, w_M)^T, \quad w \in \mathbb{R}^M, \quad h = (h_1, \dots, h_n)^T, \quad h \in \mathbb{R}^N, \quad q = (q_1, \dots, q_d)^T, \\ q \in \mathbb{R}^D, \quad S_{\tau,m}^{\Theta} \in \mathbb{R}^{M \times \Theta}, \quad S_{\tau,n}^T \in \mathbb{R}^{N \times \Theta}, \quad S_{\tau,d}^X \in \mathbb{R}^{D \times \Theta}, \quad l_m^{\Theta} \in \mathbb{R}^M, \quad l_n^T \in \mathbb{R}^N, \quad l_d^X \in \mathbb{R}^D,$$

где α_m – состояние m -го источника электроэнергии (0 – отключен, 1 – используется); β_n – состояние n -го источника тепла (0 – отключен, 1 – используется); γ_d – состояние d -го источника холода (отключен, 1 – используется); E_m^{Θ} – суммарные затраты m -го источника электроэнергии на электроснабжение АП; E_n^T – суммарные затраты n -го источника тепла на теплоснабжение АП; E_d^X – суммарные затраты d -го источника холода на хладоснабжение АП.

Рассмотрим подробнее составляющие затрат целевой функции, приведенные в формуле (1):

$$E_m^{\Theta} = Z^{\text{топл}}(w_m, S_{\tau,m}^{\Theta}) + Z^{\text{экспл}}(w_m) + Z^{\text{сеть}}(w_m, l_m^{\Theta}),$$

где $Z^{\text{топл}}(w_m, S_{\tau,m}^{\Theta})$ – расчетные затраты на топливо, расходуемое на генерацию электроэнергии; $Z^{\text{экспл}}(w_m)$ – расчетные затраты на содержание источника электроэнергии; $Z^{\text{сеть}}(w_m, l_m^{\Theta})$ – расчетные затраты на эксплуатацию сети от источника электроэнергии до потребителя;

$$E_n^T = Z^{\text{топл}}(h_n, S_{\tau,n}^T) + Z^{\text{экспл}}(h_n) + Z^{\text{сеть}}(h_n, l_n^T),$$

где $Z^{\text{топл}}(h_n, S_{\tau,n}^T)$ – расчетные затраты на топливо, расходуемое на генерацию тепловой энергии; $Z^{\text{экспл}}(h_n)$ – расчетные затраты на содержание источника тепловой энергии; $Z^{\text{сеть}}(h_n, l_n^T)$ – расчетные затраты на эксплуатацию сети от источника тепловой энергии до потребителя;

$$E_d^X = Z^{\text{топл}}(q_d, S_{\tau,d}^X) + Z^{\text{экспл}}(q_d) + Z^{\text{сеть}}(q_d, l_d^X),$$

где $Z^{\text{топл}}(q_d, S_{\tau,d}^X)$ – расчетные затраты на топливо, расходуемое на генерацию холода; $Z^{\text{экспл}}(q_d)$ – расчетные затраты на содержание источника хладоснабжения; $Z^{\text{сеть}}(q_d, l_d^X)$ – расчетные затраты на эксплуатацию сети от источника холода до потребителя.

При решении этой задачи должны выполняться следующие условия и ограничения:

- на производство электроэнергии:

$$\underline{w} \leq w_m \leq \bar{w}, \quad w \geq 0, \quad m \in M,$$

где w_m определяется в соответствии с уравнением

$$w_m = bK_m^{\text{пр}} K_m \lambda_m, \quad m \in M;$$

- на производство тепловой энергии:

$$\underline{h} \leq h_n \leq \bar{h}, \quad h \geq 0, \quad n \in N,$$

где h_n определяется в соответствии с уравнением

$$h_n = bK_n^{\text{пр}} K_n \lambda_n, \quad n \in N;$$

- на производство холода:

$$\underline{q} \leq q_d \leq \bar{q}, \quad d \in D, \quad q \geq 0,$$

где q_d определяется в соответствии с уравнением

$$q_d = bK_d^{\text{пр}} K_d \lambda_d, \quad d \in D;$$

- на соответствие производства всеми источниками энергии и спроса АП на энергию:

$$\sum_{m=1}^M w_m \geq C^{\ominus}; \quad \sum_{n=1}^N h_n \geq C^{\text{T}}; \quad \sum_{r=1}^R q_r \geq C^{\text{X}};$$

$$\sum_{\tau=0}^{\oplus} \hat{C}^{\ominus} + \sum_{\tau=0}^{\oplus} \tilde{C}^{\ominus} = \sum_{\tau=0}^{\oplus} C^{\ominus}; \quad (2)$$

- на соответствие выработанного тепла и электроэнергии для каждой ТЭЦ:

$$\underline{\varepsilon} \leq (w_m/h_n) \leq \bar{\varepsilon}, \quad m \in M, \quad n \in N, \quad (3)$$

где $K^{\text{пр}}$ – коэффициент перевода из единиц топлива в единицы энергии; K – КПД источника; λ – потери при передаче энергии в элементах системы энергоснабжения; b – расход топлива; ε – отношение выработанной электроэнергии к тепловой энергии.

Представленная выше обобщенная постановка задачи управления нагрузкой генерирующей мощности АП отличается целочисленностью, нелинейностью, сложными условиями и ограничениями, и с достаточной для принятия решения точностью может быть решена с помощью методов смешанно-целочисленного линейного программирования [7].

Методика решения задачи оптимизации загрузки источников энергии активного потребителя в соответствии с его потребностями в энергии

Для расчета энергообеспечения АП в интеллектуальных системах энергоснабжения предложена методика проведения вычислений, обеспечивающая решение поставленной выше задачи. Методика проведения вычислений состоит из следующих этапов.

1. Подготовка исходных данных для расчетной модели, что включает формирование состава и типов источников, ограничений на их мощность и производство энергии, тарифов на поставку энергии; формирование графиков потребления тепла, электроэнергии и холода.
2. Преобразование полученного множества входных данных в модель для решения задачи смешанно-целочисленного линейного программирования.
3. Решение задачи оптимизации загрузки источников энергии АП в соответствии с его потребностями.
4. Представление и интерпретация полученных результатов в виде таблиц, графиков и диаграмм, подготовка на основе полученных результатов практических рекомендаций по управлению обеспечением спроса АП.

Принципы построения и схема реализации программного обеспечения, реализующего предложенную методику, базируются на использовании компонентного подхода. В качестве решателя задач линейного программирования предлагается набор инструментов, реализованных в виде свободно распространяемой библиотеки *lp_solve* для *Java* [8, 9]. Инструментальным средством для программной реализации разработанного методического обеспечения является интегрированная среда разработки программного обеспечения *IntelliJ IDEA* [10] (разработка компании *JetBrains, (Czech Republic, Prague)*) версии *Community Edition*. Общая схема вычислительного процесса с использованием разработанного программного обеспечения показана на рис. 2. Преимущество разработанной методики проведения вычислений заключается в автоматизированном построении расчетной модели для выбранного типа программного обеспечения на базе подготовленных пользователем исходных данных.

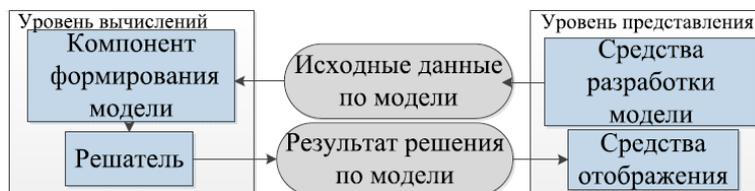


Рис. 2. Принципиальная схема проведения расчетных исследований

Практические исследования систем энергоснабжения

В рассматриваемых ниже исследованиях выделяются два типа систем энергоснабжения А. В системах энергоснабжения АП первого типа активное управление спросом на электроэнергию, состоящем из постоянной (обязательной для исполнения и не смещаемой по времени, линия синего цвета) и переменной (смещаемой по времени в зависимости от стоимости электроэнергии, линия розового цвета) частей, осуществляется только переменной частью. При этом покрытие нагрузки производится только от централизованной системы электроснабжения (далее ЦЭСС) без собственных источников генерации. В исследованиях систем энергоснабжения АП второго типа активное управление спросом на тепло, электроэнергию и холод, состоящим из постоянной части для всех видов энергии и переменной части спроса на электроэнергию, осуществляется переменной частью путем покрытия нагрузки как с привлечением источников собственной генерации АП, так и ЦЭСС и централизованной теплоснабжающей системы (далее ЦТСС). Сформированный суточный график потребления электроэнергии АП показан на рис. 3 и имеет достаточно высокую волатильность. На рис. 3 за 100% был принят суточный максимум электропотребления. Постоянная часть спроса на энергию по объему и по нагрузке сохраняется заданной в течение всего временного периода и не может смещаться по

времени, а дополняющая ее переменная часть спроса должна быть неизменной по объему, а по нагрузке она может изменяться в зависимости от стоимости энергии, т.е. перемещаться по времени.

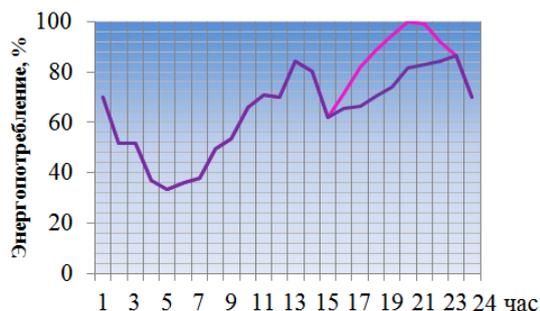


Рис. 3. Суточный график электропотребления (— э/э постоянная, — э/э переменная)

Практическое исследование системы энергоснабжения активного потребителя первого типа

Наиболее распространенным является случай, когда единственным источником электроэнергии является ЦЭСС, а свою активность потребитель может проявлять только через управление собственным энергопотреблением путем изменения величины нагрузки на основе информации о тарифе на энергию. В данном исследовании АП не имеет установок собственной генерации, при этом ЦЭСС имеет ограничение на поставку мощности в каждый момент времени. Нагрузки по тепловой энергии и хладоснабжению отсутствуют. Цель этого исследования – выяснить, как оптимально распределить переменную величину электропотребления \hat{C}_T^{\ominus} в течение рассматриваемого периода времени, чтобы минимизировать ее оплату. При этом в качестве исходных условий принимаются две ставки тарифа на электроэнергию, дифференцированные по времени суток: 2 руб./кВт·ч для периода с 00:00 до 07:00 и 3,02 руб./кВт·ч для периода с 07:00 до 00:00. Учитываемые в модели потери при передаче электроэнергии по электрическим сетям приняты равными 7%. Ограничения, накладываемые на поставляемую ЦЭСС электрическую мощность, соответствуют ее предельным возможностям и могут быть представлены в виде нестроого неравенства:

$$w_{\text{цэсс}} \leq 2500 \text{ кВт.}$$

При этом рассматриваются два варианта энергопотребления.

1.1. За график потребления электроэнергии принят суммарный суточный график потребления электроэнергии, приведенный на рис. 3 в соответствии с верхней линией; рассматриваемый спрос на электроэнергию полностью должен быть удовлетворен в текущий период времени ($\hat{C}_T^{\ominus} = 0 \Rightarrow \tilde{C}_T^{\ominus} = C_T^{\ominus}$ согласно формуле (2)).

1.2. Спрос на электроэнергию состоит из постоянной \tilde{C}_T^{\ominus} (приведенной на рис. 3) и переменной частей (ее величина равна $\hat{C}_T^{\ominus} = 2500$ кВт·ч). Переменная часть графика должна быть удовлетворена по объему, но может смещаться по времени в течение суток в зависимости от уровня стоимости электроэнергии, что обеспечивает возможность управления собственным энергопотреблением АП. Суммарное потребление электроэнергии в первом и втором вариантах одинаковое.

Результаты расчета по управлению потреблением электроэнергией для обоих вариантов показаны на рис. 4. Во втором варианте максимум потребления электроэнергии смещается на период низкой цены на нее в ночной период с учетом ограничений на поставляемую ЦЭСС электрическую мощность, что соответствует решению с минимальными затратами на покрытие необходимой нагрузки. Затраты на энергоснабжение

для первого варианта составили 111 475,8 руб., для второго варианта – 103 925,8 руб.

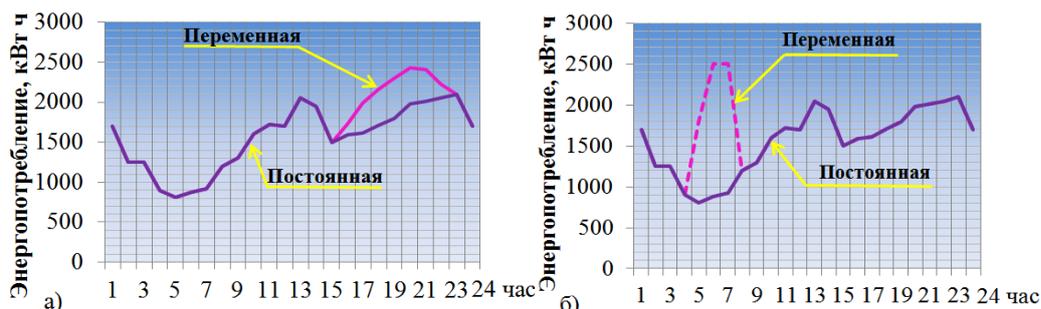


Рис. 4. Объем потребления электроэнергии из ЦЭСС для: а) первого варианта (график потребления задан); б) второго варианта (график потребления может смещаться)

Практическое исследование системы энергоснабжения активного потребителя второго типа

Цель этого исследования – определение оптимальной структуры и объемов производства энергии источниками, включая поставки ее из ЦЭСС и загрузку собственных источников, соответствующих минимальным затратам АП на свое энергоснабжение. За основу уровней потребления энергии приняты представленные на рис. 5, а и 5, б суточные графики.

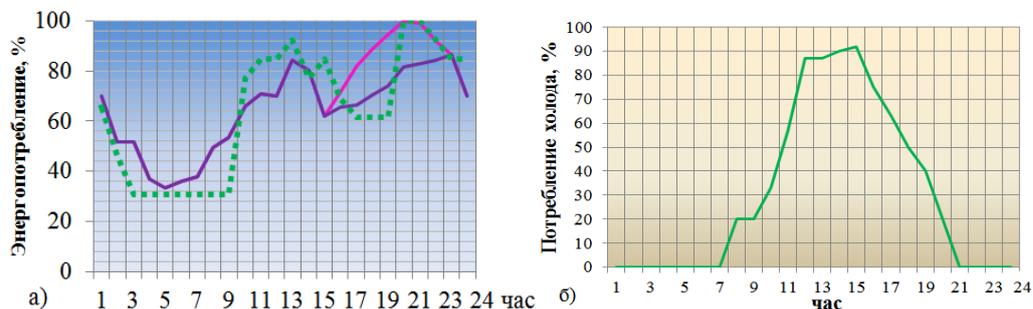


Рис. 5. Суточный график потребления: а) электроэнергии и тепла; б) холода
(— э/э постоянная, — э/э переменная, - - - т/э)

График потребления электроэнергии на рис. 5, а, как и в рассмотренном выше варианте 1.2, состоит из двух частей: постоянной, которую необходимо обязательно удовлетворить в текущий период времени, равную величине \tilde{C}_τ^{\ominus} ; переменной части по величине равной $\hat{C}_\tau^{\ominus} = 2500$ кВт·ч, которая может смещаться в течение суток в зависимости от стоимости электроэнергии. Переменная часть спроса на электроэнергию может быть обеспечена в любое время в течение суток с учетом ограничений на поставку мощности, что предоставляет определенные возможности управления собственным энергопотреблением АП. Спрос на тепловую энергию $\tilde{C}_\tau^{\text{T}}$ осуществляется в соответствии с графиком на рис. 5, а, спрос на холод $\tilde{C}_\tau^{\text{X}}$ – рис. 5, б. Схема энергоснабжения в этом случае включает системы централизованного энергоснабжения и источники собственной генерации АП. Состав собственных источников включает: угольную мини-ТЭЦ, представленную электростанцией «Нейрон-500» (далее УТЭЦ); газовую мини-ТЭЦ, представленную микротурбиной *Ingersoll Rand* (далее ГТЭЦ); холодильную машину (далее ХМ). Внешние источники централизованного энергоснабжения

включают: ЦЭСС – обеспечение электроэнергией; ЦТСС – обеспечение тепловой энергией; ХМ с подачей тепла от ЦТСС – обеспечение холодом.

Результаты расчета по управлению потреблением энергией АП показаны на рис. 6. Наиболее эффективным источником электроэнергии является УТЭЦ, но из-за ограничения на соответствие вырабатываемой тепловой и электрической энергии (см. выражение (3)) она не может работать в периоды времени с 00.00 до 8.00 часов, так как минимальное количество получаемого тепла в этом случае превышает спрос. Поэтому для покрытия электрической нагрузки в эти периоды используется ЦЭСС, тем более что в этот период она наиболее дешевая. В другое время суток при недостатке производства электроэнергии на УТЭЦ для покрытия нагрузки подключаются ЦЭСС и ГТЭЦ.

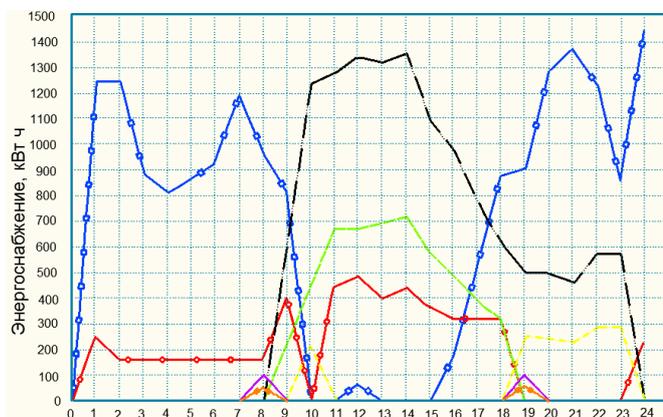


Рис. 6. Результат расчета определения рациональной загрузки источников генерации АП (Электрокотел —, ГТЭЦ т/э —, УТЭЦ т/э —, ЦТСС —, ЦЭСС —, ГТЭЦ э/э —, УТЭЦ э/э —, ГТЭЦ х/э —, УТЭЦ х/э —)

Дополнительная нагрузка, образующаяся за счет перемещения переменной части спроса на электроэнергию, покрывается за счет электроэнергии, получаемой из ЦЭСС и ее генерацией на УТЭЦ. Газовая ТЭЦ является наиболее маневренным источником тепла и электроэнергии и следующим после УТЭЦ по себестоимости производства электроэнергии и тепла, но его применение ограничено в связи с необходимостью выполнения соотношения по объемам вырабатываемой тепловой и электрической энергии. Электрокотел покрывает спрос на тепловую энергию в периоды, когда работа УТЭЦ невозможна, и в случае недостатка тепловой энергии, получаемой на УТЭЦ и ГТЭЦ. Для покрытия спроса на холод используется тепло, выработанное на ГТЭЦ и УТЭЦ, которое подается на ХМ. Суммарные затраты на генерацию электроэнергии, тепла и холода для рассматриваемой схемы АП составили 114 864,15 руб. На рис. 7 показана диаграмма, иллюстрирующая распределение затрат по источникам энергии.

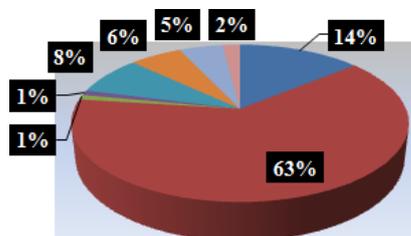


Рис. 7. Распределение затрат по источникам энергии (электрокотел —, ЦЭСС —, ГТЭЦ т/э —, УТЭЦ т/э —, ГТЭЦ э/э —, УТЭЦ э/э —, УТЭЦ х/э —)

Заключение

Выраженная актуальность исследования систем активного энергопотребления связана с тем, что современные энергосистемы преобразуются в интеллектуальные интегрированные энергосистемы. В условиях расширяющихся технических возможностей для потребителя и его стремления сократить затраты на свое энергообеспечение задача управления энергопотреблением приобретает высокую значимость. В статье приведено описание разработанного методического и программного обеспечения для расчета и оптимизации АП в интеллектуальных системах электро-, хладо- и теплоснабжения и рассмотрена связь концептуальных особенностей АП со свойствами ИИЭС. В результате проведения исследований разработано методическое обеспечение для моделирования, расчета и оптимизации АП в интеллектуальных системах электро-, хладо- и теплоснабжения. На основе принципиальных свойств, присущих ИИЭС, были сформированы функции АП в ИИЭС. С помощью разработанного программного и методического обеспечения были выполнены расчеты для исследования двух типов систем энергоснабжения с АП. Практические исследования систем централизованного энергоснабжения с АП позволили проанализировать изменение графика потребления электроэнергии при изменении спроса на электроэнергию в зависимости от ее стоимости. Практические исследования систем энергоснабжения с АП при наличии собственных источников энергии позволили оценить влияние активного поведения потребителя на загрузку централизованных систем, собственных источников энергии в зависимости от стоимости производимой ими энергии. Показано, что такое поведение обеспечивает значительное снижение платы за потребляемую энергию. Наиболее важными результатами, представленными в статье, являются:

- 1) математическая модель АП, подключенного к интеллектуальным системам электро- и тепло/хладоснабжения, позволяющая управлять энергопотреблением АП с учетом требуемого обеспечения его энергией и оптимальных затрат на энергоснабжение;
- 2) метод рационального управления нагрузкой АП, оптимальной загрузкой генерирующей мощности по электроэнергии, теплу и холоду как централизованных систем, так и собственных энергоисточников с минимумом затрат на энергоснабжение;
- 3) программная реализация разработанного методического обеспечения для моделирования АП в интеллектуальных системах электро- и тепло/хладоснабжения;
- 4) методика проведения исследований, включающая автоматизированное построение расчетной модели на базе подготовленных пользователем исходных данных.

Литература

1. Воропай Н.И., Подковальников С.В., Сендеров С.М., Стенников В.А. и др. Энергетика XXI века: Системы энергетика и управление ими. Новосибирск: Наука. 2004. 364 с.
2. Федяев А.В., Сеннова Е.В., Федяева О.Н., Карасевич А.М. Эффективность развития малых ТЭЦ на базе газотурбинных и дизельных установок при газификации регионов // Теплоэнергетика. 2000. № 12. С. 35–39.
3. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73.
4. Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А. Интегрированные энергетические системы как инновационное направление энергетики будущего // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление. 2015. С. 47–55.
5. Митра С., Сан Л., Гроссман И.Е. Распределение нагрузки промышленных ТЭЦ в условиях дифференцированного тарифа на электроэнергию // Energy 2013; 54: 194–211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.030>.
6. Zhou Z, Liu P, Li Z, Pistikopoulos E.N., Georgiadis M.C. Impacts of equipment off-design characteristics on the optimal design and operation of combined cooling, heating and power systems. Computers and chemical engineering. 2013;48:40–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.08.007>.

7. Гасс С. И. Линейное программирование. Методы и приложения. М.: Физико-математическая литература. 1961. 300 с.
8. Эккель Б. Философия Java. 4-е изд. СПб.: Питер, 2009. 640 с.
9. Справочник по Ip_solve. URL: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> (дата обращения: 10.05.2017).
10. Давыдов С.В., Ефимов А.А. IntelliJ IDEA. Профессиональное программирование на Java. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 800 с.

Авторы публикации

Стенников Валерий Алексеевич – чл.-кор. РАН, профессор, врио директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). E-mail: sva@isem.irk.ru.

Барактенко Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru.

Соколов Дмитрий Витальевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). E-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru.

Шелехова Вероника Борисовна – аспирант, инженер Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). E-mail: vsb@isem.irk.ru.

References

1. Voropai N. I., Podkovaľnikov S.M., Senderov S.M., Stennikov V.A. and others. Energetika XXI veka: sistemy energetiki i upravlenie imi [Energy of the XXI century: Energy systems control]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 364 p.
2. Karasevich A.M., Fedyayev A.V., Sennova E.V., Fedyayeva O.N. The efficiency of implementation small-scale cogeneration plants by gas turbines and diesel generators in context of installation of gas service in districts. Teploenergetika [Thermal engineering, vol. 47, №12, pp. 1084–1089], 2000, №11. pp. 24–26.
3. Voropai N. I., Stennikov V.A. Integrated intellectual energy systems. Izvestiya Akademii nauk. Energetika. [Bulletin of Academy of sciences. Energy], 2014. № 1. pp. 64–73. (in Russ.).
4. Voropai N. I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Integrated energy systems as innovative way of future energy. [Proceedings of conference Energy in XXI century in Russia. Innovative development and control]. 2015. pp. 47–55. (in Russ.).
5. Mitra S, Sun L, Grossmann IE. Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices. Energy 2013; 54: 194–211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.030>.
6. Zhou Z, Liu P, Li Z, Pistikopoulos E.N., Georgiadis M.C. Impacts of equipment off-design characteristics on the optimal design and operation of combined cooling, heating and power systems. Computers and chemical engineering. 2013;48:40–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.08.007>.
7. Gass S. I. Linear programming: methods and applications. New York and London. McGraw-Hill Book Co. Inc., 1958. 223 p. (Russ. ed.: Gass S. I. Lineynoye programmirovaniye: metody i podkholdy. Moscow. Fizmatlit Publ., 1961. 300 p.).
8. Eckel B. Thinking in Java. 4 edition. Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall Publ., 2006. 1150 p. (Russ. ed.: Ekkel B. Filosofiya Java. 4 edition. Saint Petersburg. Piter Publ., 2009. 640 p.).
9. Ip_solve reference guide // URL: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> (accessed data: 10.05.2017).
10. Davydov S.V., Efimov A.A. IntelliJ IDEA. Professional'noye programmirovaniye na Java [IntelliJ IDEA. Professional Java programming]. St. Petersburg. BHV-Peterburg Publ., 2005. 800 p.

© *В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, В.Б. Шелехова*

Authors of the publication

Valery A. Stennikov – Corresponding Member of RAS, Prof., Acting Director of Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS (ESI SB RAS).

Evgeny A. Barakhtenko –Cand.Sci. (Techn.), Senior Research of ESI SB RAS.

Dmitry V. Sokolov – Cand.Sci. (Techn.), Senior Research of ESI SB RAS.

Veronika B. Shelekhova – Postgraduate, Engineer of ESI SB RAS.

Поступила в редакцию

3 июля 2017 г.

УДК 620.9; 621.1

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ ЗА СЧЕТ ВКЛЮЧЕНИЯ В СХЕМУ АБСОРБЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕПЛОТЫ

Р.Н. Валиев, Ш.Г. Зиганшин, Ю.В. Ваньков, Р.Р. Гарипов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
valievkgeu@yandex.ru

***Резюме:** В данной статье рассмотрен вопрос повышения эффективности парогазовой установки с одноконтурным котлом-утилизатором за счет включения в схему абсорбционного бромисто-литиевого преобразователя теплоты.*

***Ключевые слова:** парогазовая установка, одноконтурный котел-утилизатор, абсорбционный бромисто-литиевый преобразователь теплоты, повышение эффективности.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE COMBINED CYCLE PLANT WITH HEAT-RECOVERY BOILER DUE TO THE INCLUSION IN THE SCHEME OF ABSORPTION CONVERTER OF HEAT

R.N. Valiev, S.G. Ziganshin, U.V. Vankov, R.R. Garipov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
valievkgeu@yandex.ru

***Abstract:** In this article the question of increase of efficiency of the combined cycle plant with single-loop heat-recovery boiler due to the inclusion in the scheme of absorption bromide lithium converter of heat.*

***Keywords:** combined cycle plant, single-loop waste heat boiler, absorption bromide lithium converter of heat, improving the efficiency.*

Целью исследования является разработка схемного решения, в котором совместно с парогазовой установкой с одноконтурным котлом утилизатором (далее по тексту ПГУ) будет задействован абсорбционный бромисто-литиевый преобразователь теплоты (далее по тексту АБПТ).

Описание базового варианта одноконтурной ПГУ [1–3]

Схема базового варианта одноконтурной ПГУ показана на рис. 1. Основными элементами ПГУ являются: газотурбинная установка 1, котел-утилизатор 2 и паровая турбина 3. Котел-утилизатор имеет пять теплообменных поверхностей: пароперегреватель ПП, испаритель И1, экономайзер Э, газовый подогреватель конденсата ГПК и газовый подогреватель сетевой воды ГПСВ. Для имитации потребителя теплоты после ГПСВ в схему включен водо-водяной теплообменник ВВТО. На схеме также выделены и пронумерованы: деаэратор 4, конденсатор паровой турбины 5, барабан котла-утилизатора 6, градирня обратного водоснабжения 7.

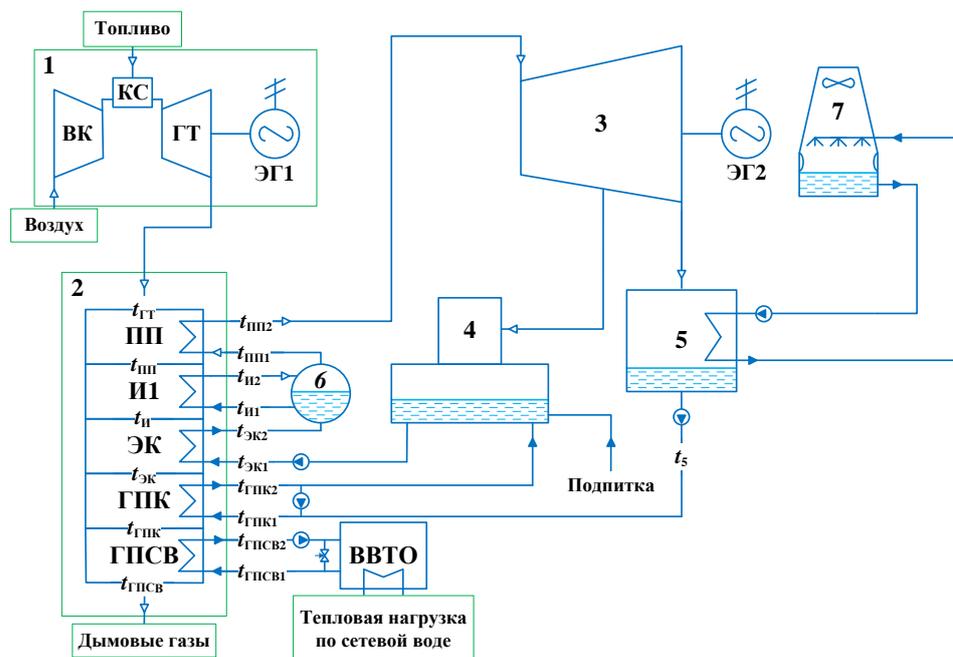


Рис.1. Схема базового варианта ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором:
 1 – газотурбинная установка; 2 – котел-утилизатор (КУ); 3 – паровая турбина; 4 – деаэра­тор; 5 – конденсатор паровой турбины; 6 – барабан; 7 – градирня оборотного водоснабжения. Буквенные обозначения: КС – камера сгорания; ВК – воздушный компрессор; ГТ – газовая турбина; ЭГ1 – электрогенератор газовой турбины; ЭГ2 – электрогенератор паровой турбины; И1 – испаритель; Э – экономайзер; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ГПСВ – газовый подогреватель сетевой воды; ВВТО – водо-водяной теплообменник. Расшифровка принятых обозначений температур потоков на схеме приведена в табл. 2

В камере сгорания газотурбинной установки сжигается топливо, смешанное с воздухом после воздушного компрессора, и образуются дымовые газы, которые направляются в газовую турбину для совершения полезной работы, в результате которой вырабатывается электрическая энергия. Отработанные в газовой турбине дымовые газы, пройдя через теплообменные поверхности котла-утилизатора и дымовую трубу, рассеиваются в атмосфере. В теплообменных поверхностях котла-утилизатора за счет теплообмена с дымовыми газами вырабатывается перегретый водяной пар и нагревается вода. Выработанный пар поступает в паровую турбину для совершения полезной работы, в результате которой вырабатывается электрическая энергия. Отработанный пар из паровой турбины отводится в конденсатор паровой турбины, в котором поддерживается необходимое разрежение и происходит теплообмен с обратной водой, для конденсации. Образовавшийся конденсат перекачивается через газовый подогреватель конденсата, где подогревается до заданной температуры, в деаэра­тор. В деаэра­тор также поступают: греющий пар из промежуточного отбора паровой турбины и химочищенная вода из цеха химводоподготовки. Из деаэра­тора питательная вода подается в экономайзер. Цикл замыкается. Теплофикационная вода нагревается в газовом подогревателе сетевой воды.

Описание АБПТ [4–7]

Схема АБПТ показана на рис. 2. Абсорбционный бромисто-литиевый преобразователь теплоты состоит из пяти основных элементов: генератора Г, конденсатора К, испарителя И2, абсорбера А и теплообменника растворов ТО.

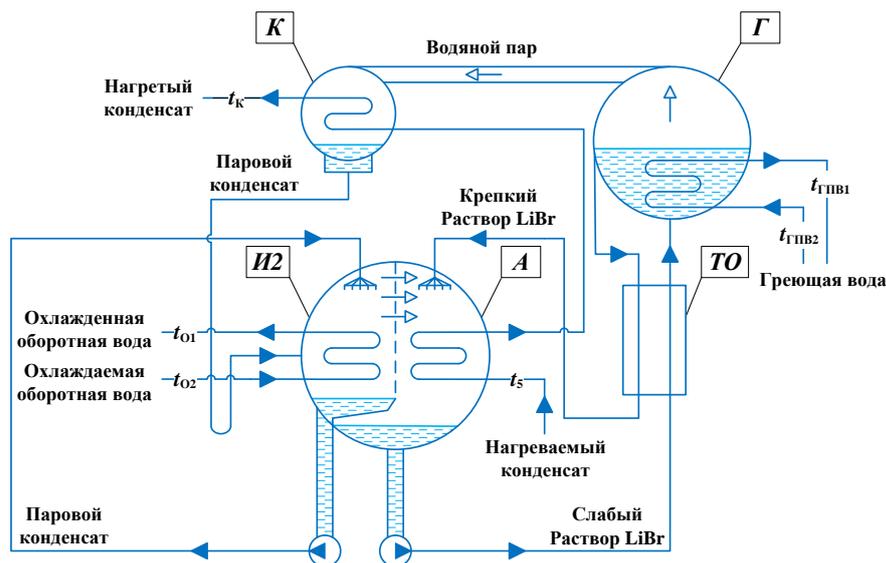


Рис 2. Схема АБПТ:

Г – генератор; К – конденсатор; И2 – испаритель; А – абсорбер;
ТО – теплообменник. Расшифровки обозначений температур потоков приведены в табл. 1

В генератор подводится высоко- или среднетенциальная теплота от греющего источника в виде продуктов сгорания, водяного пара или горячей воды, в результате чего слабый раствор (раствор с низкой концентрацией бромистого лития) кипит с образованием водяного пара и крепкого раствора (раствора с высокой концентрацией бромистого лития).

Полученный водяной пар направляется в конденсатор, а оставшийся после выпаривания крепкий раствор через теплообменник растворов подается в абсорбер. В конденсаторе водяной пар конденсируется за счет передачи теплоты нагреваемому технологическому потоку, а образовавшийся паровой конденсат через гидрозатвор отводится в испаритель. В испарителе создается и поддерживается необходимое разрежение, при котором паровой конденсат кипит за счет организации теплообмена с потоком низкопотенциальной теплоты в виде нагретой оборотной воды. Выработанный в испарителе водяной пар переходит в абсорбер.

В абсорбере водяной пар орошается крепким раствором и конденсируется с образованием слабого раствора. Теплота, выделившаяся в процессе абсорбции, передается нагреваемому технологическому потоку. Слабый раствор из абсорбера через теплообменник растворов перекачивается в генератор и цикл замыкается.

Коэффициент преобразования теплоты, который может быть получен в АБПТ, зависит от потенциала используемых источников теплоты, параметров термодинамического цикла, свойств раствора и характеристик оборудования [8–11].

Описание нового варианта одноконтурной ПГУ

Схема нового варианта одноконтурной ПГУ показана на рис. 3.

Принципиальные отличия предлагаемой схемы ПГУ от базовой заключаются:

- в добавлении в схему АБПТ;
- в установке дополнительной поверхности нагрева в котле-утилизаторе;
- в использовании низкопотенциальной теплоты оборотной воды.

В базовой схеме без АБПТ конденсат из конденсатора паровой турбины перед подачей в деаэрактор нагревается в газовом подогревателе конденсата ГПК (рис. 1).

В новой схеме нагреваемый конденсат последовательно проходит через три теплообменные поверхности: абсорбер АБПТ, конденсатор АБПТ и газовый подогреватель конденсата ГПК.

Для обогрева генератора АБПТ в качестве теплоносителя используется вода, нагреваемая в дополнительной поверхности нагрева котла-утилизатора, газовом подогревателе воды ГПВ.

Для обогрева испарителя АБПТ в качестве теплоносителя используется низкопотенциальная теплота оборотной воды после конденсатора паровой турбины.

В остальном новая схема по описанию идентична базовой схеме, показанной на рис. 1.

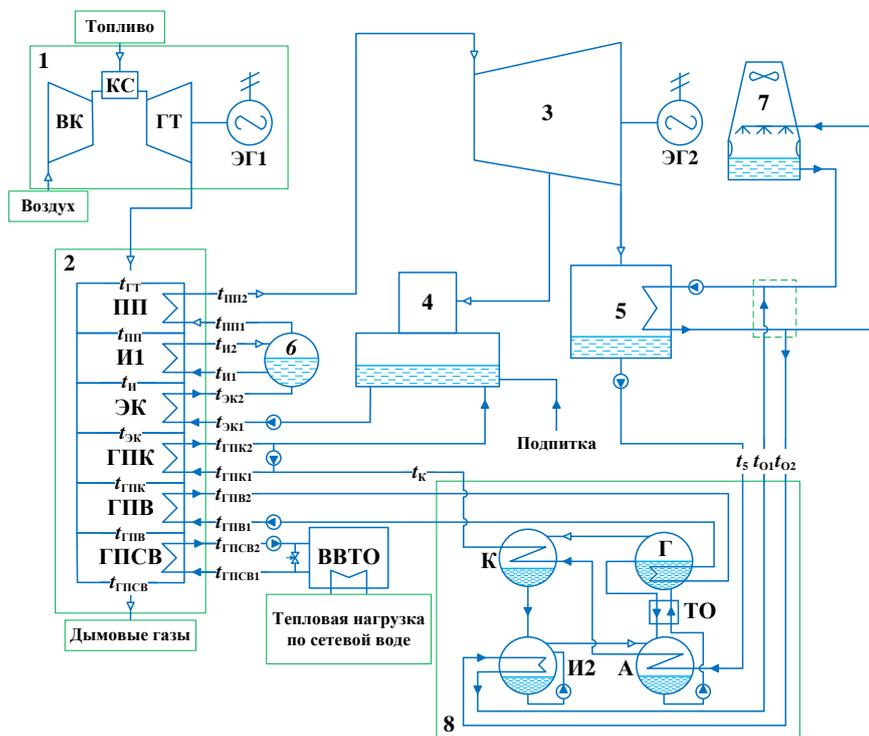


Рис. 3. Схема нового варианта ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором и АБПТ:

1 – газотурбинная установка; 2 – котел-утилизатор (КУ); 3 – паровая турбина; 4 – деаэратор; 5 – конденсатор паровой турбины; 6 – барабан КУ; 7 – градирня оборотного водоснабжения; 8 – АБПТ. Буквенные обозначения: КС – камера сгорания; ВК – воздушный компрессор; ГТ – газовая турбина; ЭГ1 – электрогенератор газовой турбины; ЭГ2 – электрогенератор паровой турбины; И1 – испаритель КУ; Э – экономайзер КУ; ГПК – газовый подогреватель конденсата КУ; ГПВ – газовый подогреватель воды КУ; ГПСВ – газовый подогреватель сетевой воды КУ; ВВТО – водо-водяной теплообменник; Г – генератор АБПТ; И2 – испаритель АБПТ; К – конденсатор АБПТ; А – абсорбер АБПТ. Расшифровка принятых обозначений температур потоков на схеме приведена в табл. 1, 3

Преимуществом нового схемного решения является увеличение тепловой мощности ГПСВ. Недостатком – усложнение схемы и дополнительные затраты на приобретение и внедрение нового оборудования.

Методика сравнительной оценки эффективности

Для сравнительной оценки эффективности базовой и новой схем ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором были определены исходные данные и произведены необходимые расчеты в следующей последовательности: 1) расчет базовой схемы ПГУ; 2)

расчет АБПТ; 3) расчет новой схемы ПГУ; 3) сравнительная оценка теплоэнергетической эффективности включения АБПТ в схему ПГУ на основе анализа полученных результатов.

Расчет схем ПГУ проводился в компьютерной программе, предназначенной для расчета тепловых схем парогазовых установок с котлами-утилизаторами. В основу рабочего алгоритма программы заложены общепринятые классические методики расчета тепловых схем ПГУ [1]. Для ввода исходных данных и вывода результатов в программе использованы возможности пакета *Microsoft Excel* со встроенным языком программирования *VBA*.

Для сопоставимости результатов расчета базового и нового вариантов схемы ПГУ генерируемая установками электрическая мощность, параметры и количество вырабатываемого перегретого водяного пара, а также температура покидающих котел-утилизатор дымовых газов приняты одинаковыми и определялись для четырех рабочих режимов с наиболее характерными температурами наружного воздуха.

Расчет АБПТ проводился отдельно от расчета тепловых схем ПГУ по общепринятым классическим методикам, приведенным в литературе [5, 6]. Тепловые нагрузки аппаратов АБПТ определялись по расходу конденсата из паровой турбины.

Полученные результаты

Показатели, представляющие интерес для сравнительной оценки эффективности базовой и новой схем ПГУ, приведены для АБПТ в табл. 1, для базового варианта схемы ПГУ – в табл. 2, для нового варианта схемы ПГУ – в табл. 3.

Таблица 1

Показатели АБПТ

№ п/п	Наименование величины и размерность	Обозначение	Температура наружного воздуха, °С			
			-32	-18	-5,2	8
1	Тепловая нагрузка генератора, кВт	$Q_{Г}$	1550	1550	1530	1495
2	Тепловая нагрузка испарителя, кВт	Q_0	1088	1087	1071,47	1047,2
3	Тепловая нагрузка конденсатора, кВт	$Q_{К}$	1153	1152	1134,9	1109,27
4	Тепловая нагрузка абсорбера, кВт	$Q_{А}$	1490,29	1489,29	1466,2	1433,08
5	Тепловая нагрузка промежуточного теплообменника, кВт	$Q_{ТО}$	347,93	345,26	342,3	334,58
6	Температура греющей воды на входе в генератор, °С	$t_{ГТВ2}$	160	160	160	160
7	Температура греющей воды на выходе из генератора, °С	$t_{ГТВ1}$	130	130	130	130
8	Температура оборотной воды на входе в испаритель, °С	t_{O2}	35	35	35	35
9	Температура оборотной воды на выходе из испарителя, °С	t_{O1}	20	20	20	20
10	Температура конденсата паровой турбины на входе в абсорбер, °С	t_5	39	39	39	39
12	Температура конденсата паровой турбины на выходе из конденсатора, °С	$t_{К}=t_{ГПК1}$	75	75	75	75
13	Расход греющей воды через генератор, кг/с	$G_{Г}$	12,01	12	11,89	11,56
14	Расход конденсата паровой турбины через абсорбер и конденсатор, кг/с	$G_{А}=G_{К}$	17,49	17,47	17,21	16,82
15	Расход оборотной воды через испаритель, кг/с	$G_{И}$	17,27	17,26	17	16,62

Показатели базовой схемы ПГУ

№ п/п	Наименование величины и размерность	Обозначение	Температура наружного воздуха, °С			
			-32,0	-18,0	-5,2	8,0
1	Температура дымовых газов за газовой турбиной, °С	$t_{ГТ}$	518,7	526,4	532,7	538,8
2	Температура дымовых газов за пароперегревателем, °С	$t_{ПП}$	454,0	458,4	462,0	465,4
3	Температура дымовых газов за испарителем, °С	$t_{И}$	255,4	255,4	255,4	255,4
4	Температура дымовых газов за экономайзером, °С	$t_{ЭК}$	215,7	214,8	214,0	213,3
5	Температура дымовых газов за ГПК, °С	$t_{ГПК}$	166,4	164,4	162,7	161,1
6	Температура дымовых газов за ГПСВ, °С	$t_{ГПСВ}$	110,0	110,0	110,0	110,0
7	Давление пара на выходе из пароперегревателя, МПа	$P_{ПП}$	3,5	3,5	3,5	3,5
8	Температура пара на выходе из пароперегревателя, °С	$t_{ПП2}$	478,7	486,4	492,7	498,8
9	Температура пара на входе в пароперегреватель, °С	$t_{ПП1}$	478,7	486,4	492,7	498,8
10	Температура пара на выходе из испарителя, °С	$t_{ИП2}$	245,4	245,4	245,4	245,4
11	Температура воды на входе в испаритель, °С	$t_{ИП1}$	245,4	245,4	245,4	245,4
12	Температура воды на выходе из экономайзера, °С	$t_{ИП2}$	235,4	235,4	235,4	235,4
13	Температура воды на входе в экономайзер, °С	$t_{ИП1}$	159,4	159,4	159,4	159,4
14	Температура воды на выходе из ГПК, °С	$T_{ГПК2}$	143,8	143,8	143,8	143,8
15	Температура воды на входе в ГПК, °С	$t_{ГКП1}$	60,0	60,0	60,0	60,0
16	Температура воды на выходе из ГПСВ, °С	$t_{ГПСВ2}$	140,0	140,0	140,0	140,0
17	Температура воды на входе в ГПСВ, °С	$t_{ГПСВ1}$	80,0	65,0	60,0	60,0
18	Температура прямой воды тепловой сети, °С	τ_{01}	130,0	98,0	70,0	70,0
19	Температура обратной воды в тепловой сети, °С	τ_{02}	70,0	55,0	42,0	42,0
18	Тепловая мощность ГПСВ, МВт	$Q_{ГПСВ}$	8,77	8,25	7,73	7,21
19	Расход дымовых газов за ГТ, кг/с	$G_{ДГ}$	146,0	142,6	138,0	132,7
20	Расход пара через пароперегреватель, кг/с	$G_{ПП}$	18,10	18,07	17,80	17,40
21	Расход воды на испаритель, кг/с	$G_{И}$	18,10	18,07	17,80	17,40
22	Расход воды через экономайзер, кг/с	$G_{Э}$	18,47	18,44	18,16	17,75
23	Расход воды через ГПК, кг/с	$G_{ГПК}$	21,83	21,80	21,47	20,99
24	Расход воды через ГПСВ, кг/с	$G_{ГПСВ}$	34,59	26,08	22,94	21,38

Показатели новой схемы ПГУ

№ п/п	Наименование величины и размерность	Обозначение	Температура наружного воздуха, °С			
			-32,0	-18,0	-5,2	8,0
1	Температура дымовых газов за газовой турбиной, °С	$t_{ГТ}$	518,7	526,4	532,7	538,8
2	Температура дымовых газов за пароперегревателем, °С	$t_{ПП}$	454,0	458,4	462,0	465,4
3	Температура дымовых газов за испарителем, °С	$t_{И}$	255,4	255,4	255,4	255,4
4	Температура дымовых газов за экономайзером, °С	$t_{ЭК}$	215,7	214,8	214,0	213,3
5	Температура дымовых газов за ГПК, °С	$t_{ГПК}$	183,3	181,6	180,3	179,0
6	Температура дымовых газов за ГПВ, °С	$t_{ГПВ}$	173,4	171,5	169,9	168,5
7	Температура дымовых газов за ГПСВ, °С	$t_{ГПСВ}$	110,0	110,0	110,0	110,0
8	Давление пара на выходе из пароперегревателя, МПа	$P_{ПП}$	3,5	3,5	3,5	3,5
9	Температура пара на выходе из пароперегревателя, °С	$t_{ПП2}$	478,7	486,4	492,7	498,8
10	Температура пара на входе в пароперегреватель, °С	$t_{ПП1}$	478,7	486,4	492,7	498,8
11	Температура пара на выходе из испарителя, °С	$t_{ИП2}$	245,4	245,4	245,4	245,4
12	Температура воды на входе в испаритель, °С	$t_{ИП1}$	245,4	245,4	245,4	245,4
13	Температура воды на выходе из экономайзера, °С	$t_{ЭП2}$	235,4	235,4	235,4	235,4
14	Температура воды на входе в экономайзер, °С	$t_{ЭП1}$	159,4	159,4	159,4	159,4
15	Температура воды на выходе из ГПК, °С	$T_{ГПК2}$	143,8	143,8	143,8	143,8
16	Температура воды на входе в ГПК, °С	$t_{ГПК1}$	75	75	75	75
17	Температура воды на выходе из ГПВ, °С	$T_{ГПВ2}$	160	160	160	160
18	Температура воды на входе в ГПВ, °С	$t_{ГПВ1}$	130	130	130	130
19	Температура воды на выходе из ГПСВ, °С	$t_{ГПСВ2}$	140,0	140,0	140,0	140,0
18	Температура воды на входе в ГПСВ, °С	$t_{ГПСВ1}$	80,0	65,0	60,0	60,0
19	Температура прямой воды тепловой сети, °С	t_{01}	130,0	98,0	70,0	70,0
20	Температура обратной воды в тепловой сети, °С	t_{02}	70,0	55,0	42,0	42,0
21	Тепловая мощность ГПСВ, МВт	$Q_{ГПСВ}$	9,85	9,33	8,79	8,20
22	Расход дымовых газов за ГТ, кг/с	$G_{ДГ}$	146,0	142,6	138,0	132,7
23	Расход пара через пароперегреватель, кг/с	$G_{ПП}$	18,10	18,07	17,80	17,40
24	Расход воды на испаритель, кг/с	$G_{И}$	18,10	18,07	17,80	17,40
25	Расход воды через экономайзер, кг/с	$G_{Э}$	18,47	18,44	18,16	17,75
26	Расход воды через ГПК, кг/с	$G_{ГПК}$	17,49	17,47	17,21	16,82
27	Расход воды через ГПВ, кг/с	$G_{ГПВ}$	12,01	12	11,89	11,56
28	Расход воды через ГПСВ, кг/с	$G_{ГПСВ}$	38,87	29,51	26,08	24,48

Гистограмма изменения температуры дымовых газов в теплообменных поверхностях котла-утилизатора для базового и нового вариантов схемы показана на рис. 5.

Гистограмма построена для климатических условий г. Казань при средней температуре наружного воздуха для отопительного периода $-5,2^{\circ}\text{C}$.

Из гистограммы и табл. 1 и 2 видно, что в новой схеме, благодаря предварительному нагреву конденсата после паровой турбины в абсорбере АБПТ и конденсаторе АБПТ, при прочих равных условиях температура дымовых газов на входе в газовый подогреватель сетевой воды выше на 7°C .

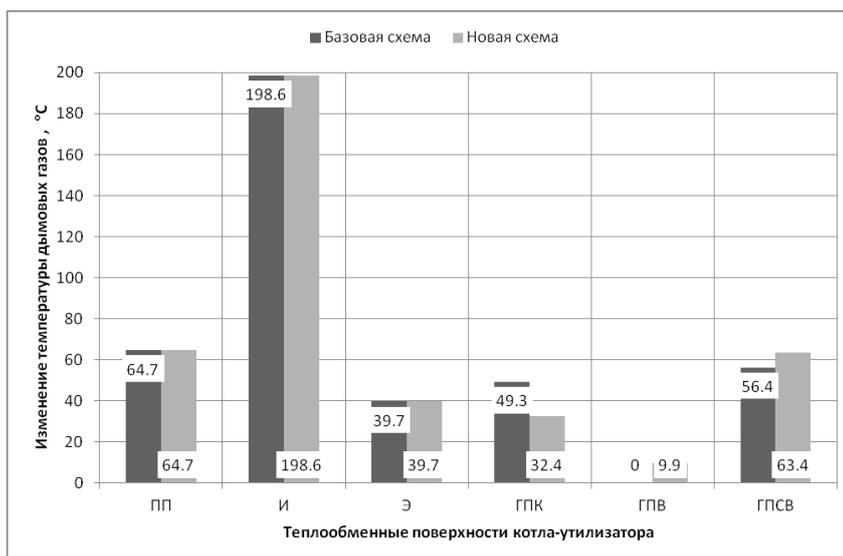


Рис. 5. Изменение температуры дымовых газов в теплообменных поверхностях котла-утилизатора для базового и нового вариантов схемы ПГУ: ПП – пароперегреватель; И – испаритель; Э – экономайзер; ГПК – газовый подогреватель конденсата (в базовой схеме теплосъем больше на $49,3-32,4=16,9^{\circ}\text{C}$); ГПВ – газовый подогреватель воды для генератора АБПТ (в базовой схеме ГПВ отсутствует, в новой схеме теплосъем в ГПВ составляет $9,9^{\circ}\text{C}$); ГПСВ – газовый подогреватель сетевой воды (в новой схеме теплосъем увеличился на $63,4-56,4=7^{\circ}\text{C}$)

На рис. 6 показан график тепловой мощности газового подогревателя сетевой воды в зависимости от температуры наружного воздуха для базового и нового вариантов схемы.

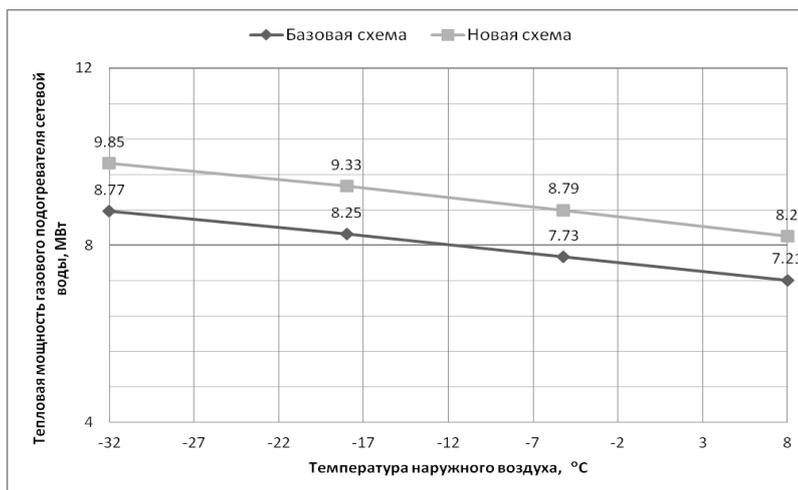


Рис.6. Тепловая мощность газового подогревателя сетевой воды в зависимости от температуры наружного воздуха для базового и нового вариантов схемы ПГУ

Из графика следует, что в новом варианте схемы ПГУ тепловая мощность газового подогревателя сетевой воды в рассмотренном интервале наружных температур может быть, при прочих равных условиях, увеличена, по сравнению с базовым вариантом, на $0,99\text{ MWt}$

при температуре наружного воздуха +8°C, на 1,06 МВт при температуре наружного воздуха -5,2°C; на 1,08 МВт при температурах наружного воздуха -18 и -32°C.

Выводы

1. Предложено и рассмотрено новое схемное решение для ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором и АБПТ.

2. Проведено расчетное исследование и получены результаты, подтверждающие теплоэнергетическую эффективность новой схемы ПГУ по сравнению с базовым вариантом. В заданном интервале температур наружного воздуха тепловая мощность газового подогревателя сетевой воды за счет установки АБПТ увеличена на 12–14 % от своего прежнего значения.

3. Увеличение тепловой мощности ГПСВ при прочих равных условиях позволяет получить дополнительный доход от реализации тепловой энергии, который можно приближенно оценить по формуле, руб/год,

$$\Delta D_{TЭ} = 1,163 \Delta Q_{TЭ} \tau_{TЭ} C_{TЭ} \eta_{TЭ}, \quad (1)$$

где $\Delta D_{TЭ}$ – доход от реализации дополнительной тепловой мощности, руб/год; 1,163 – коэффициент для перевода МВт в Гкал/ч; $\Delta Q_{TЭ}$ – дополнительно реализуемая тепловая мощность, МВт; $\tau_{TЭ}$ – число часов в году, в течение которых реализуется дополнительная тепловая мощность, ч/год; $C_{TЭ}$ – отпускная цена 1 Гкал тепловой энергии, руб/Гкал; $\eta_{TЭ}$ – коэффициент полезного действия тарифа, учитывающий все дополнительные неучтенные в тарифе расходы и потери в процессе производства, транспортировки, распределения и реализации дополнительной тепловой мощности, о.е.

Например, при увеличении отпуска теплоты потребителям на $\Delta Q_{TЭ} = 1$ МВт, при условии реализации тепловой энергии в течение $\tau_{TЭ} = 8400$ часов/год и принятой стоимости тепловой энергии $C_{TЭ} = 1626$ руб/Гкал, с заданным коэффициентом полезного действия тарифа $\eta_{TЭ} = 0,5$, дополнительный годовой доход составит

$$\Delta D_{TЭ} = 1,163 \Delta Q_{TЭ} \tau_{TЭ} C_{TЭ} \eta_{TЭ} = 1,163 \cdot 1 \cdot 8400 \cdot 1626 \cdot 0,5 = 7\,942\,360 \text{ руб/год.}$$

Литература

1. Трухницкий А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов по направлению подготовки «Энергетическое машиностроение» и «Теплоэнергетика и теплотехника». Москва: Издательский дом МЭИ, 2013. 646 с.
2. Щинников П.А., Назаренко Г.В., Григорьева О.К. и др. Комплексный анализ парогазовых ТЭЦ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 15–20.
3. Heejin Cho, Amanda D. Smith, Pedro Mago, Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization, Applied Energy. 2014. Volume 136. P. 168–185.
4. Ноздренко Г.В., Щинников П.А., Томилов В.Г. Пугач Ю.Л. Двухтрубная система теплоснабжения с абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2000. № 5-6. С. 25–28.
5. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты: моногр. СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 338 с.
6. Тимофеевский Л.С., Пекарев В.И., Бухарин Н.Н. и др. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч.1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ. СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 260 с.
7. Галимова Л.В. Эффективность энергосберегающих систем на базе абсорбционных термотрансформаторов: автореф. дис.... д-ра техн. наук. Астрахань: Астрахан. ГТУ, 2004. 32 с.
8. Christian Keil, Stefan Plura, Michael Radspieler, Christian Schweigler, Application of customized absorption heat pumps for utilization of low-grade heat sources, Applied Thermal Engineering, Volume 28, Issue 16, 2008, p. 2070–2076.
9. Романюк В.Н., Бобич А.А. Абсорбционные тепловые насосы на ТЭЦ Белорусской ОЭС на примере Мозырской ТЭЦ // Энергия и Менеджмент. 2015. № 1. С. 13–20.

10. Романюк В.Н, Бобич А.А. Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы // Энергия и Менеджмент. 2016. № 1. С. 14–23.

11. Романюк В.Н, Бобич А.А. Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 376–390.

Авторы публикации

Валиев Радик Нурттинович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: valievkgeu@yandex.ru.

Зиганшин Шамиль Гаязович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: shz@list.ru.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: yvankov@mail.ru.

Гарипов Ранис Рафисович – магистр техники и технологий кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Parogazovye ustanovki elektrostantsiy: uchebnoe posobie dlya vuzov po napravleniyu podgotovki "Energeticheskoe mashinostroenie" i "Teploenergetika i teplotekhnika" / A. D. Trukhniy. Moskva: Izdatelskiy dom MEI, 2013, 646 p.

2. Kompleksnyy analiz parogazovykh TETs [Tekst] / P. A. Shchinnikov [i dr.] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. 2010. № 3-4. P. 15-20.

3. Heejin Cho, Amanda D. Smith, Pedro Mago, Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization, Applied Energy, Volume 136, 2014, p. 168-185.

4. Dvukhtrubnaya sistema teplosnabzheniya s absorbtionnym bromisto-litievym teplovym nasosom / G. V. Nozdrenko [i dr.]. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2000. № 5-6. P. 25-28.

5. Absorbtsionnye preobrazovateli teploty / Baranenko A. V., Timofeevskiy L. S., Dolotov A. G., Popov A. V.: monogr. SPb.: SPbGUNIPT, 2006, 338 p.

6. Teplovye i konstruktivnye raschety kholodilnykh mashin, teplovykh nasosov i termotransformatorov. Ch.I. Raschet tsiklov, termodinamicheskikh i teplofizicheskikh svoystv rabochikh veshchestv / Timofeevskiy L. S., Pekarev V. I., Bukharin N. N. i dr. SPb.: SPbGUNIPT, 2006, 260 p.

7. Effektivnost energosberegayushchikh sistem na baze absorbtionnykh termotransformatorov / Galimova L.V.: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk. Astrakhan: Astrakhan. GTU, 2004, 32 p.

8. Christian Keil, Stefan Plura, Michael Radspieler, Christian Schweigler, Application of customized absorption heat pumps for utilization of low-grade heat sources, Applied Thermal Engineering, Volume 28, Issue 16, 2008, p. 2070–2076.

9. Absorbtsionnye teplovye nasosy na TETs Belorusskoy OES na primere Mozyrskoy TETs / V.N. Romanyuk, A.A. Bobich // Energiya i Menedzhment. 2015. No. 1. P. 13–20.

10. Obosnovanie parametrov ABTN dlya utilizatsii VER na TETs s pomoshchyu passivnogo eksperimenta i opredelenie sootvetstvuyushchikh izmeneniy razlichnykh otsenok raboty energosistemy / V.N. Romanyuk, A.A. Bobich // Energiya i Menedzhment. 2016. No. 1. P. 14–23.

11. Chislennoe issledovanie teplovykh skhem TETs s pomoshchyu ikh topologicheskikh modeley / V. N. Romanyuk, A. A. Bobich // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. obedineniy SNG. 2016. Vol. 59, No. 4. P. 376–390.

Authors of the publication

Radik N. Valiev – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Cand. Sci. of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Shamil G. Ziganshin – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Cand. Sci. of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Yury V. Vankov – Dr. Sci. (Techn.), Prof. of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Ranis R. Garipov – Mag. Sci. (Techn.) of department “Industrial Heat Power Engineering and system of heating supply” (IHPE) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Поступила в редакцию

26 июня 2017 г.

УДК 621.1.0116

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ В КАНАЛАХ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ПРОЦЕССА

А.Г. Лаптев¹, М.М. Башаров², Т.М. Фарахов³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «ТАНЕКО», г. Нижнекамск, Россия

³Инженерно-внедренческий центр «ИНЖЕХИМ», г. Казань, Россия

Резюме: Рассмотрены уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи от гладкой поверхности, полученные с применением моделей турбулентного пограничного слоя Прандтля и Дайслера. Показано, что учет возмущений в пограничном слое (шероховатость стенки, выступы, кольцевые накатки) можно выполнить параметрически за счет корректировки динамической скорости, толщины вязкого подслоя и толщины пограничного слоя. Даны результаты расчетов средних значений коэффициентов теплоотдачи (в безразмерном виде чисел Нуссельта и Стантона) и сравнение с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: теплообмен, интенсификация, теплоотдача, шероховатая поверхность.

Благодарности. Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (№13.6384.2017/БЧ).

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN CHANNELS WITH INTENSIFIERS PROCESS

Laptev A. G.¹, Basharov M. M.², Farakhov T. M.³

¹ Kazan state power engineering University, Kazan

² JSC "TANECO", Nizhnekamsk

³ OOO computer center "INZHEKHIM", Kazan

Abstract: Reviewed equations for calculation of heat transfer coefficients from a smooth surface, obtained with the use of models of the turbulent boundary layer Prandtl and Deisler. It is shown that the inclusion of disturbances in the boundary layer (roughness of the walls, ledges, ring rolling) can be performed parametrically by adjusting the dynamic speed, the thickness of a viscous sublayer and boundary layer thickness. The results of calculations of the average values of heat transfer coefficients (in dimensionless form of Nusselt numbers and Stanton) and comparing with known experimental data.

Keywords: heat transfer enhancement, heat transfer, rough surface.

Acknowledgments: Thanks. The work was carried out within the framework of the basic part of the state task in the sphere of scientific activity (No. 13.6384.2017 / BC).

Введение

Для интенсификации теплообмена могут использоваться как активные, так и пассивные методы. К последним относятся шероховатость поверхности, лунки, кольцевые накатки, закрутка потока, пористые вставки, мелкие насадки и др. [1–8].

Ниже показан пример использования уравнений, полученных авторами [9, 10] для плоского пограничного слоя, а учет возмущений, вызванных интенсификацией явлений переноса, учитывается параметрически, что позволяет приближенно вычислять средние коэффициенты теплоотдачи с использованием коэффициентов гидравлического сопротивления.

Коэффициенты теплоотдачи

В работе [9] на основе применения модели Прандтля получено выражение для коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме движения среды:

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_*}{\left(R_1 + \frac{1}{\chi} \ln \frac{R_\delta}{R_1} \right) \text{Pr}^{0,57}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды кг/м³; $R_\delta = u_* \delta / \nu$ – безразмерная толщина пограничного слоя; $R_1 = u_* \delta_1 / \nu$ – безразмерная толщина вязкого подслоя, ($R_1 = 11,6$); χ – константа турбулентности, ($\chi = 0,4$); Pr – число Прандтля; u_* – динамическая скорость м/с; $u_* = u_\infty \sqrt{C_f / 2}$, где u_∞ – средняя скорость в ядре потока, м/с; C_f – коэффициент трения; c_p – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Для пластины и трубы выражение (1) записано в безразмерном виде:

$$\text{Nu}_L = \frac{\text{Re}_L \sqrt{C_f / 2} \text{Pr}^{0,43}}{R_1 + 2,5 \ln(R_\delta / R_1)}, \quad (2)$$

$$\text{Nu}_d = \frac{\text{Re}_d \sqrt{\xi / 8} \text{Pr}^{0,43}}{R_1 + 2,5 \ln(R_\delta / R_1)}, \quad (3)$$

где $\text{Nu}_L = \alpha L / \lambda$ – число Нуссельта для пластины; $\text{Nu}_d = \alpha d / \lambda$ – число Нуссельта для трубы; $\text{Re}_L = u_\infty L / \nu$; $\text{Re}_d = u_{cp} d / \nu$ – числа Рейнольдса; d – диаметр трубы, м; λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); L – длина пластины, м;

С применением модели диффузионного пограничного слоя и функции турбулентного обмена Дайслера получены выражения [10]:

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_*}{[5,31 + 2,5 \ln R_\delta] \text{Pr}^{0,57}}, \quad (4)$$

$$\text{Nu}_L = \frac{\text{Re}_L \sqrt{C_f / 2} \text{Pr}^{0,43}}{5,31 + 2,5 \ln R_\delta}. \quad (5)$$

Рассмотрим применение уравнений (2)–(5) для шероховатых поверхностей.

Известно, что если $ku_* / \nu < 5$ (k – высота выступов, м), то все элементы шероховатости расположены внутри вязкого подслоя, их обтекание происходит без вихреобразований, и шероховатость не оказывает влияния на характеристики турбулентного течения. Если $5 < ku_* / \nu \leq 70$, то элементы шероховатости выступают из вязкого подслоя, вызывают дополнительное сопротивление и интенсификацию теплоотдачи. Если $ku_* / \nu > 70$ – режим с полным проявлением шероховатости, и коэффициент сопротивления ξ_{III} не зависит от числа Рейнольдса, а определяется только величиной относительной шероховатости.

Для расчета коэффициентов ξ_{III} шероховатых поверхностей используются полуэмпирические зависимости или графики [1, 2, 4].

Значения безразмерных параметров R_1 и R_δ в выражениях (1)–(5) для шероховатых поверхностей будут отличаться от значений $R_1 = 11,6$ и R_δ для гладких поверхностей. Расчет $R_{1ш}$ и R_δ для поверхностей с элементами интенсификации можно выполнять по зависимостям [9]:

$$R_{1ш} = 11,6 \sqrt{\frac{\xi}{\xi_{ш}}}, \quad (6)$$

$$R_\delta = 0,25 Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8}, \quad (7)$$

где ξ , $\xi_{ш}$ – коэффициенты сопротивлений гладкой и шероховатой поверхностей.

Значительно более сложной задачей является определение средней динамической скорости на стенке с элементами интенсификации.

Если $ku_*/\nu < 70$, то с небольшой погрешностью можно использовать известные выражения для пластины и трубы:

$$u_{*ш} = u_\infty \sqrt{C_{fш}/2}, \quad u_{*ш} = u_{ср} \sqrt{\xi_{ш}/8}. \quad (8)$$

При $ku_*/\nu > 70$ применяется подход вычисления u_* с использованием средней скорости диссипации энергии [4–6].

Выражение (3) для расчета числа Нуссельта от шероховатой поверхности с параметрами (6)–(8) получит вид

$$Nu_{ш} = \frac{Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8} Pr^{0,43}}{11,6 \sqrt{\xi/\xi_{ш}} + 2,5 \ln \left(\frac{0,25 Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8}}{11,6 \sqrt{\xi/\xi_{ш}}} \right)}, \quad (9)$$

где при $4 \cdot 10^3 < Re_d < 10^5$, $\xi = 0,136 Re_d^{-0,25}$; при $10^5 < Re_d < 2 \cdot 10^6$
 $\xi = 0,0032 + 0,22 Re_d^{-0,237}$.

Аналогично можно записать и выражения (4), (5). В выражении (4) в знаменателе численное значение 5,31 фактически является безразмерной толщиной вязкого подслоя в трехслойной модели. Тогда, используя соотношение (6) только со значением $R_1' = 5,31$, число Нуссельта для шероховатой поверхности запишется в форме

$$Nu_{ш} = \frac{Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8} Pr^{0,43}}{5,31 \sqrt{\xi/\xi_{ш}} + 2,5 \ln \left(0,25 Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8} \right)}. \quad (10)$$

Очевидно, что при $\xi_{ш} = \xi$ выражения (9), (10) дают результаты для гладкой поверхности.

Для сравнения результатов расчетов чисел для шероховатых поверхностей используем как известные полуэмпирические выражения, так и экспериментальные данные различных авторов.

При $Pr < 5$ рекомендуется приближенное выражение Кутателадзе для труб:

$$Nu_{ш} \approx 0,14 \sqrt{\xi_{ш}} Re_d Pr \left[\ln \frac{Re_d \sqrt{\xi_{ш}}}{290} + 4,6 Pr \right]^{-1}, \quad (11)$$

и также выражение Дипрея и Саберского:

$$Nu_{ш} = \frac{\xi_{ш} Re_d Pr}{8} \left[\left(5,19 \varepsilon^{*0,2} Pr^{0,44} - 8,48 \right) \sqrt{\xi_{ш}/8} + 1 \right]^{-1}, \quad (12)$$

где $\varepsilon^* = (k/d) Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8}$; $10^4 \leq Re_d \leq 2 \cdot 10^5$.

На основе модификации гидродинамической аналогии на градиентные течения получено [11]:

$$Nu_{ш} = 0,158 Re_d^{0,857} (\xi_{ш}/8)^{0,429} Pr^{1/3}. \quad (13)$$

В табл. 1 даны результаты расчетов по приведенным выражениям.

Таблица 1

Результаты расчетов чисел $Nu_{ш}$ для шероховатых поверхностей ($Pr=1, d/k=60$)

Re_d	$\frac{\xi}{\xi_{ш}}$	Формула $Nu_{ш}$			
		(10)	(11)	(12)	(13)
10^4	$\frac{0,0316}{0,039}$	40,0	42,0	48,7	42,3
$5 \cdot 10^4$	$\frac{0,021}{0,045}$	188,3	181	225	184,9
$2 \cdot 10^5$	$\frac{0,0155}{0,0456}$	668,1	610	740	606,8

Запишем выражение (10) в более удобном для расчетов виде. Используя отношения (6)–(7) с $\xi = 0,316 Re_d^{-0,25}$, ($4 \cdot 10^3 < Re_d < 10^5$) получим:

$$Nu_{dш} = \frac{Re_d \sqrt{\xi_{ш}/8} Pr^{0,43}}{6,52 \left(Re_d^{0,125} \xi_{ш}^{0,5} \right)^{-1} + 2,5 \ln(0,0135 Re_d^{1,125} \xi_{ш})}. \quad (14)$$

Очевидно, что при $\xi_{ш} = \xi$ получаем формулу (3).

Аналогично запишем число Стантона для канала с шероховатой поверхностью ($St = Nu/RePr$):

$$St_{ш} = \frac{\sqrt{\xi_{ш}/8}}{Pr^{0,57} \left[6,52 \left(Re_d^{0,125} \xi_{ш}^{0,5} \right)^{-1} + 2,5 \ln(0,0135 Re_d^{1,125} \xi_{ш}) \right]}. \quad (15)$$

Результаты расчетов

Результаты расчета по формуле (15) и сравнение с экспериментом показаны на рис. 1.

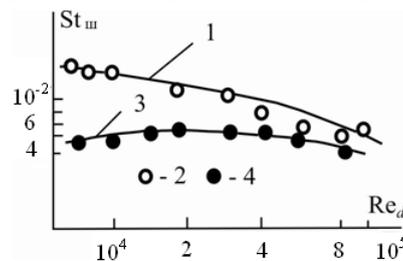


Рис. 1. Результаты расчета и опытные данные по теплоотдаче в канале с шероховатыми стенками: 1, 3 – расчет по уравнению (15); 2, 4 – эксперимент [1]; 1, 2 – $k/R = 0,08$; 3, 4 – $k/R = 0,02$; $Pr = 0,71$ (k – высота выступов)

На рис. 2 нанесена область, занимаемая опытными данными [3; 12] для каналов с поперечными кольцевыми выступами применительно к газам: относительный шаг поперечных кольцевых выступов $t/d = 0,25 \dots 1,0$; отношение внутреннего диаметра трубы в области выступов к внутреннему диаметру гладкой трубы $0,9 \dots 0,95$. Как видно, зависимость $Nu_{ш}/Nu$ от $\xi_{ш}/\xi$ справедлива только при $\xi_{ш}/\xi < 2$.

Конечно, расчет чисел Нуссельта и Стантона по формулам (9) и (10) дает средние значения коэффициентов теплоотдачи и не позволяет учесть локальные возмущения (отрыв

потока, отрицательное значение градиента давления и т.п.), однако для промышленных аппаратов этого вполне достаточно при их проектировании или модернизации.

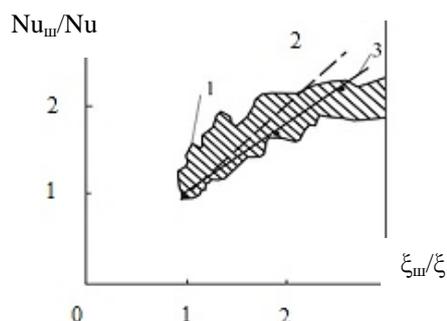


Рис. 2. Относительная эффективность интенсификации теплообмена поперечными кольцевыми выступами в круглом канале: 1 – область, занимаемая экспериментальными точками; 2 – при $Nu_{III}/Nu = \xi_{III}/\xi$; 3 – расчет по формуле (10)

Следует отметить, что рекомендуемое соотношение $Nu_{III}/Nu = \xi_{III}/\xi$, для некоторых способов интенсификации, дает завышенное значение для шероховатых поверхностей при $\xi_{III}/\xi > 2,0$ (рис. 2).

В табл. 2 приведены экспериментальные результаты для трубы с накаткой и расчет по полученным формулам.

Таблица 2

Сравнительная тепло-гидравлическая характеристика для труб с кольцевой накаткой по отношению к гладкой трубе для $0,5 < Pr < 50$; $\bar{Nu} = Nu_{III} / Nu$; $\bar{\xi} = \xi_{III} / \xi$. $\bar{Nu}_э$ – экспериментальные значения [2]

Re=10 ⁴				
d ₁ /d ₂	$\bar{\xi}$	\bar{Nu}	\bar{Nu} по (9)	\bar{Nu} по (14)
0,99	1,45	1,25	1,21	1,29
0,95	3,28	2,14	1,93	1,97
0,91	5,2	2,6	2,49	2,53
0,89	6,32	2,65	2,76	2,79
0,99	1,2	1,35	1,08	1,073
0,95	3,22	2,28	1,92	1,8
0,91	7,36	2,78	2,93	2,74
0,89	9,2	2,82	3,22	3,04

В табл. 2 отношение расстояния между накатками Δx к диаметру трубы d_2 : $\Delta x/d_2 = 0,25$; d_1 – диаметр трубы с учетом накатки, м.

Из табл. 2 следует, что при $Re=10^4$ среднее расхождение расчета с экспериментом составляет около 5%, максимальное – 8%. Также расчет показывает, что при $Re=10^5$ максимальное – около 35%, среднее – 18%.

Выводы

Полученные выражения для Nu_{III} рекомендуются для инженерных расчетов, когда есть данные по гидравлическому сопротивлению и нет данных по теплоотдаче, и могут использоваться как для гладких, так и для шероховатых поверхностей, так при $\xi_{III} = \xi$ имеем $Nu_{III} = Nu$ для гладких труб.

Следует отметить, что выражения (9) и (10) можно использовать для приближенных расчетов в каналах с постоянной закруткой потока. В этом случае динамическая скорость записывается из уравнения баланса сил в виде $u_* = u_\infty \sqrt{\xi_{s3} / (8 \cos \theta)}$, ξ_{s3} – коэффициент

сопротивления канала с закруткой; θ – угол закрутки потока. В результате получаем выражения, аналогичные (9), (10), которые обеспечивают удовлетворительное согласование с опытными данными по средним коэффициентам теплоотдачи [13].

Литература

1. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
3. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов: учебно-справочное пособие. М.: «Теплотехник», 2011. 335 с.
4. Готовский М.А., Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Теплоотдача и сопротивление каналов с олуенными поверхностями. СПб.: СТРАТА, 2016. 210 с.
5. Min C., Oi C., Wang E., Tian L. and OinY. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in a channel with novel longitudinal vortex generators // Int. Journal of Heat and Mass Transf. 2012. V. 55. pp. 7268–7277.
6. Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhukova Yu.V. Numerical simulation of vortex heat transfer enhancement in transformer oil in a channel with one-row spherical dimples // Heat Transfer Research.-2011. V. 42. No. 7. pp. 613–628.
7. 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. С. 72–78.
8. Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Система охлаждения масляного трансформатора с применением термоэкспериментальных модулей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 56–59.
9. Лаптев А.Г., Башаров М.М. Эффективность теплообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса. Казань: Центр инновационных технологий, 2016. 344 с.
10. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахов Т.М. Тепло- и массоотдача в возмущенных турбулентных пограничных слоях // Труды Академэнерго. 2016. № 1. С. 53–71.
11. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и теплообмен). Казань: Издательство «Печать-Сервис XXI век», 2015. 236 с.
12. Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов / под редакцией акад. В.Е. Алемасова. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 143 с.
13. Башаров М.М., Рунов Д.М. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах с закруткой потока при турбулентном режиме // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 11–12. С. 63–68.

Авторы публикации

Лаптев Анатолий Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива» (ТВТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Башаров Марат Миннахматович – канд. техн. наук, зам. ген. директора по техническому обслуживанию и инжинирингу АО «ТАНЕКО», г. Нижнекамск.

Фарахов Тимур Мансурович – канд. техн. наук, главный инженер Инженерно-внедренческого центра «Инжехим», г. Казань.

References

1. Zhukauskas A.A. Konvektivnyi perenos v teploobmennikakh. M.: Nauka, 1982. 472 p.
2. Kutateladze S.S. Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: Spravochnoe posobie M.: Energoatomizdat, 1990. 367 p.

3. Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. Metody intensivatsii i modelirovaniya teplomassoobmennykh protsessov: uchebno-spravochnoe posobie. M.: «Teplotekhnika», 2011. 335 p.
4. Gotovskii M.A., Demenok S.L., Medvedev V.V., Sivukha S.M. Teplootdacha i soprotivlenie kanalov s olunennymi poverkhnostyami. SPB.: STRATA, 2016. 210 p.
5. Min C., Oi C., Wang E., Tian L. and Oin Y. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in a channel with novel longitudinal vortex generators // Int. Journal of Heat and Mass Transf. 2012. Vol. 55. P. 7268–7277.
6. Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhukova Yu.V. Numerical simulation of vortex heat transfer enhancement in transformer oil in a channel with one-row spherical dimples // Heat Transfer Research. -2011. Vol. 42. No. 7. P. 613–628.
7. Brodov Yu.M., Aronson K.E., Ryabchikov A.Yu. i dr. Povyshenie effektivnosti teploobmennykh apparatov paroturbinykh ustanovok za schet primeneniya profil'nykh vitykh trubok // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2016. No. 7–8. P. 72–78.
8. Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Sistema okhlazhdeniya maslyanogo transformatora s primeneniem termoeksperimental'nykh modulei // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2015. No. 11–12. P. 56–59.
9. Laptev A.G., Basharov M.M. Effektivnost' teploobmena i razdeleniya geterogennykh sred v apparatakh neftegazokhimicheskogo kompleksa. Kazan': Tsentri innovatsionnykh tekhnologii. 2016. 344 p.
10. Laptev A.G., Basharov M.M., Farakhov T.M. Teplo- i massootdacha v vozmushchennykh turbulentnykh pogranychnykh sloyakh // Trudy Akademenergo. 2016. No. 1. P. 53–71.
11. Lapteva E.A., Laptev A.G. Prikladnye aspekty yavlenii perenosa v apparatakh khimicheskoi tekhnologii i teploenergetiki (gidromekhanika i teplomassoobmen). Kazan': Izdatel'stvo «Pechat'-Servis XXI vek», 2015. 236 p.
12. Shchukin A.V., Kozlov A.P., Agachev R.S., Chudnovskii Ya.P. Intensifikatsiya teploobmena sfericheskimi vyemkami pri vozdeistvii vozmushchayushchikh faktorov / pod redaktsiei akad. V.E. Alemasova. Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2003. 143 p.
13. Basharov M.M., Runov D.M. Opredelenie koeffitsientov teplootdachi v kanalakh s zakrutkoi potoka pri turbulentnom rezhime // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2014. No. 11–12. P. 63–68.

Information about the authors

Anatoly G. Laptev – Dr. Sci. (Techn.), Professor, head. The Department "Technology of water and fuel" of Kazan state power engineering University.

Marat M. Basharov – Cand. Sci. (Techn.), Deputy General Director for technical services and engineering of JSC "TANECO"

Timur M. Farakhov – Cand. Sci. (Techn.), Chief Engineer of Engineering and Development Center "Inzhekhim"

Поступила в редакцию

31 октября 2017 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.9

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКОЙ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА

А.Н. Мракин¹, Д.Г. Сотников¹, О.В. Афанасьева²

¹Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3982-9735>, anton1987.87@mail.ru

Резюме: В статье представлен обзор современного состояния работ по комплексному использованию углеводородного сырья для энергообеспечения промышленных и коммунально-бытовых потребителей, а также генерации технологического газа. Предложена тепловая схема энергохимической установки с комбинированной выработкой энергоносителей (тепловой и электрической энергии) и технологического газа, содержащего H_2 и CO . Зарегистрирован программный продукт в виде математической модели реактора частичного окисления, который позволил оценить параметры синтез-газа при коэффициенте расхода воздуха $\alpha=0,7$, степени повышения давления $\pi_k=5$ и удельном расходе водяного пара $6,5$ кг/кг ($N_2=35,8\%$; $H_2O=50,2\%$; $CO_2=5,9\%$; $CO=2,6\%$; $H_2=5,5\%$ и температура $1570^\circ C$), а также геометрические размеры аппарата $D=1,3$ м и $L=10,8$ м.

Ключевые слова: топливо, окислитель, дутьевой пар, синтез-газ, энергохимическая установка, энергоноситель.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10036).

DEVELOPMENT OF ENERGY-CHEMICAL INSTALLATION WITH COMBINED PRODUCTION OF ENERGY CARRIERS AND TECHNOLOGICAL GAS

A.N. Mrakin¹, D.G. Sotnikov¹, O.V. Afanaseva²

¹Saratov State Technical Gagarin Yu.A. University, Saratov, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3982-9735>, anton1987.87@mail.ru

Abstract: The article presents an overview of the current state of work on the integrated use of hydrocarbon raw materials for energy supply to industrial and domestic consumers, as well as generation of process gas. A thermal scheme of an energy-chemical plant with a combined production of energy carriers (thermal and electric energy) and a process gas containing H_2 and CO is proposed.

The software product was registered in the form of a mathematical model of a partial oxidation reactor, which made it possible to estimate the parameters of gas synthesis at an air flow coefficient of $\alpha=0,7$, a pressure increase of $\pi_k=5$, and a specific steam flow rate of 6,5 kg/kg ($N_2=35,8\%$, $H_2O=50,2\%$, $CO_2=5,9\%$, $CO=2,6\%$, $H_2=5,5\%$ and temperature 1570 °C), as well as geometrical dimensions of the apparatus $D=1,3$ m and $L=10,8$ m.

Keywords: fuel, oxidant, blowing steam, synthesis gas, energy-chemical plant, energy carrier.

Acknowledgments: The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project № 17-79-10036).

Введение

Низкое значение коэффициента извлечения традиционных углеводородов, проблема утилизации нестабильного газового конденсата на малых и средних месторождениях углеводородов, поскольку его стабилизация и транспортировка экономически целесообразна на крупных месторождениях или на специальных предприятиях, образование в больших объемах нефтешламов и отходов нефтепереработки, а также ограниченность традиционных легкодоступных ресурсов нефти, газа и газового конденсата побуждают разрабатывать меры по повышению энергетической эффективности технологических процессов, а также вовлекать в топливно-энергетический баланс альтернативные виды энергоносителей (нестабильный газовый конденсат, отходы нефтехимических производств, попутный нефтяной газ и другие) [1, 2]. При этом наиболее перспективным направлением является термохимическая конверсия углеводородов на базе пиролиза [3] или газификации [4], которые позволяют расширить сферу применения некондиционных топлив и организовать энерготехнологические установки с комбинированной выработкой энергоносителей и химических продуктов.

Теоретические основы и результаты

Известна технологическая схема парокислородной газификации жидких топлив по способу «Тексако» с получением газов для производства аммиака и спиртов [5]. Однако данная схема характеризуется повышенной металлоёмкостью системы очистки синтез-газа, вызванной применением двух скрубберов для поглощения CO_2 раствором карбоната и раствором моноэтаноламина. Кроме того, применение в качестве окислителя только кислорода связано с дополнительными энергозатратами на его получение.

Получение технологического газа для ведения восстановительных процессов возможно организовать на базе энергометаллургической установки [6], включающей конвертер для получения восстановительного газа, турбокомпрессор для подачи сжатого воздуха в конвертер и подключённый к конвертеру металлургический агрегат. При этом также возможна организация работы установки по второму варианту, отличающемуся тем, что к линии, соединяющей компрессор и конвертер, параллельно подключена установка для получения кислорода, т.е. такое решение позволяет только при необходимости задействовать энергоёмкий процесс получения кислорода. Но и такой вариант организации процесса не лишен недостатков: установка характеризуется большой поверхностью нагрева регенеративного подогревателя ввиду низкого коэффициента теплопередачи системы «газ–газ», вследствие чего возрастает металлоёмкость установки; применение катализатора для конверсии топлива связано с дополнительными капитальными затратами, а также затратами на его обслуживание и регенерацию.

Технологии частичного окисления топлива (газификации) находят распространение и в процессах комбинированной выработки электроэнергии и жидкого синтетического топлива с использованием газотурбинных и парогазовых установок [7], которые характеризуются: относительно низкой надёжностью ввиду большого числа элементов схемы; ограниченностью в выборе используемых топлив, т.к. основным топливом является

Установка работает следующим образом. Реактор частичного окисления 3 потребляет воздух, технический кислород (98% O₂) или их смесь (обогащённый кислородом воздух) от компрессора 1 и/или воздуходелительной станции 2 и водяной (дутьевой) пар от парового котла-утилизатора 6 для осуществления технологического процесса газификации жидкого или газообразного топлива. В качестве реактора частичного окисления 3 может быть использована выносная камера сгорания, расположенная в отдельном силовом корпусе и имеющая трубопроводы для подвода топлива, дутьевого пара, воздуха и/или кислорода и отвода газов, например камера сгорания ГТЭ-35 ХТЗ. Преобразование химической энергии топлива в тепловую осуществляется в процессе окисления. Процесс окисления в реакторе частичного окисления обеспечивается следующим: подачей воздуха (окислителя) и топлива в количестве, необходимом для создания смеси определённого состава; созданием необходимого температурного уровня; наличием зоны, где скорость перемещения топливовоздушной смеси равна скорости распространения пламени. Эта зона называется зоной стабилизации фронта пламени. Образование топливовоздушной смеси обеспечивается: дроблением топлива; перемешиванием топлива и окислителя; испарением жидкой фазы топлива. Дробление топлива осуществляется форсунками для жидкого топлива и газовыми насадками для газообразного топлива. Перемешивание топлива и окислителя происходит за счёт дополнительной турбулизации потока с помощью фронтального устройства.

Образовавшиеся в реакторе частичного окисления продукты реакции поступают в газовую турбину 4, приводящую во вращение электрогенератор 5. Отработавший синтез-газ с давлением, необходимым для преодоления аэродинамического сопротивления технологического оборудования и нормального ведения процессов синтеза, подают в котёл-утилизатор 6, где его охлаждают, и затем направляют в контактный конденсатор 7 для конденсации водяного пара, который отводится в резервуар для хранения воды 12. Далее синтез-газ подают в скруббер для поглощения кислого газа жидким поглотителем 17, дальнейшей очистки и доведения соотношения компонентов до требуемых значений по технологическому регламенту дальнейшего использования синтез-газа. Подготовленный таким образом синтез-газ, состоящий из азота, водорода и оксида углерода передают технологическому потребителю или могут использовать для генерации энергоносителей (тепловой и электрической энергии). Часть пара, вырабатываемого в котле-утилизаторе 6, подают в реактор частичного окисления 3, оставшийся пар реализуют потребителю. Электрогенератор 5 газотурбинной установки вырабатывает электрическую энергию, передаваемую потребителям. Из резервуара для хранения воды 12 через охладитель конденсационной воды 10, где конденсационная вода охлаждается технической водой из системы оборотного водоснабжения, и фильтр конденсационной воды 11 с использованием насоса конденсационной воды 9 и системы водоподготовки 8, связанной с трубопроводом подачи технической воды к системе водоподготовки, охлаждённая вода подаётся в контактный конденсатор 7. Конденсат от потребителя возвращают в резервуар для хранения воды 12, откуда через деаэратор 14 с использованием конденсатного насоса 13 и питательного насоса 15, питательная вода проходит через экономайзерно-испарительную часть котла-утилизатора 6 и попадает в сепаратор 16, где разделяется на пар и воду. Водяной пар проходит через пароперегревательную часть котла-утилизатора 6 и подаётся в реактор частичного окисления 3, а также отводится потребителю, а вода возвращается в деаэратор 14. Поглотитель, насыщенный кислым газом, из скруббера для поглощения кислого газа жидким поглотителем 17 подают в регенеративный теплообменник 18, где он забирает тепло у регенерированного поглотителя, и в регенератор жидкого поглотителя 19, где происходит процесс регенерации. При этом из нижней части регенератора жидкого поглотителя 19 отбирается часть регенерируемого поглотителя и проходит через подогреватель жидкого поглотителя для регенерации 21, где нагревается греющим теплоносителем из системы нагрева регенерируемого поглотителя, после чего возвращается в регенератор. Регенерированный поглотитель подают в теплообменник 18, где он отдаёт тепло поглотителю, насыщенному кислым газом, затем в холодильник 20, где

охлаждается технической водой из системы охлаждения жидкого поглотителя, после чего возвращают в скруббер для поглощения кислого газа жидким поглотителем 17.

Побочными продуктами технологического процесса являются газообразный азот от воздухоразделительной станции 2 и кислый газ от регенератора жидкого поглотителя 19.

Нами разработан специальный программный продукт [9], позволяющий проводить варианты расчеты по определению состава синтез-газа, его температуре и ряду других показателей в зависимости от коэффициента расхода воздуха, состава исходного топлива, параметров дутьевого пара, степени повышения давления в компрессоре и пр. Для примера приведем результаты расчета при использовании в качестве исходного топлива нестабильного газового конденсата следующего состава [10]: $\text{CH}_4=16,1\%$; $\text{C}_2\text{H}_6=3,1\%$; $\text{C}_3\text{H}_8=1,6\%$; $i\text{-C}_4\text{H}_{10}=1,1\%$; $n\text{-C}_4\text{H}_{10}=1,0\%$; $i\text{-C}_5\text{H}_{12}=0,5\%$; $n\text{-C}_5\text{H}_{12}=0,9\%$; $\text{C}_{6+}=73,8\%$; $\text{CO}_2=1,8\%$; $\text{CH}_3\text{OH}=0,1\%$; энтальпии дутьевого водяного пара $h=2681$ кДж/кг; температуре газового конденсата -27 °С, коэффициенте расхода окислителя $\alpha=0,7$, степени повышения давления $\pi_k=5$ и удельном расходе водяного пара $6,5$ кг/кг:

1) состав – $\text{N}_2=35,8\%$; $\text{H}_2\text{O}=50,2\%$; $\text{CO}_2=5,9\%$; $\text{CO}=2,6\%$; $\text{H}_2=5,5\%$.

2) температура – 1570 °С.

Также с использованием расчетных формул, представленных в работе [10], для переработки в реакторе частичного окисления 1400 кг/ч газового конденсата при нефорсированном режиме работы с удельной теплонапряженностью сечения камеры $U_F=120$ Вт/(м²·Па) были получены следующие геометрические размеры камеры: $D=1,3$ м и $L=10,8$ м.

Обсуждение

Таким образом, в предложенной энергохимической установке с газификацией топлива используется принцип ступенчатого охлаждения синтез-газа в котле-утилизаторе и контактном конденсаторе. При этом вырабатывается водяной пар, применяемый для повышения содержания водорода в получаемом синтез-газе, а непрореагировавший водяной пар без потерь выделяется в виде конденсата. Кроме того, за счёт комбинированной выработки энергоносителей снижается их удельная себестоимость и повышается технико-экономическая эффективность производства. Использование системы очистки синтез-газа от CO_2 жидким поглотителем на выходе из установки обеспечивает снижение вредных выбросов в окружающую среду, а применение меньшего числа элементов схемы, по сравнению с рассмотренными, ведет к повышению надежности.

Заключение

Предложена тепловая схема энергохимической установки для получения технологических газов пригодного для производства аммиака, спиртов, альдегидов и других химических продуктов, а также способная к интеграции в схемах энерготехнологического комбинирования при утилизации стабильного и нестабильного газового конденсата, отходов нефтехимических производств, при обеспечении потребителей водородосодержащим синтез-газом, электрической и тепловой энергией.

Литература

1. Lapidus A.L. Production of alternative motor fuels based on natural gas / Lapidus A.L., Golubeva I.A., Krylov I.F., Zhagfarov F.G. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. №5. P. 305–312.
2. Lapidus A.L. Chemical processing of natural gas and gas condensate / Lapidus A.L., Zhagfarov F.G., Grigor'eva N.A., Khudyakov D.S., Kozlov A.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 141–147.
3. Kaddour O. Production of olefin and aromatic hydrocarbons by pyrolysis of gas condensate / Kaddour O., Sherbi A., Busenna A., Kolesnikov I.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. No. 6. P. 440–442.
4. Malkov Yu.P. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas / Malkov Yu.P., Molchanov O.N., Britov B.K., Fedorov I.A. // Journal of engineering physics and thermophysics. 2016. Vol. 89. No. 6. P. 1545–1553.

5. Рябцев И.И., Волков А.Е. Производство газа из жидких топлив для синтеза аммиака и спиртов. М.: Химия, 1968. 208 с.
6. Энергометаллургическая установка: а.с. №461238. СССР / Н.В. Лавров, В.Г. Каширский, В.Н. Лункин, С.Ф. Евланов, А.И. Попов. 1975. Бюл. 7.
7. Комбинированный способ производства электроэнергии и жидкого синтетического топлива с использованием газотурбинных и парогазовых установок: патент №2250872 Российской Федерации / Батенин В.М., Масленников В.М., Толчинский Л.С. 2005. Бюл. 12.
8. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.
9. Программа расчета реактора частичного окисления топлива: Программа для ЭВМ 2017615007 Российской Федерации / Д.Г. Сотников, А.Н. Мракин. 2017.
10. Мракин А.Н., Сотников Д.Г., Селиванов А.А. Построение расчетной модели определения геометрических размеров реактора частичного окисления топлива // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 8. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы XIII Междунар. научно-техн. конф. Саратов: ИП Беглакова Е.С., 2016. С. 318–322.

Авторы публикации

Мракин Антон Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. E-mail:anton1987.87@mail.ru.

Сотников Дмитрий Геннадьевич – аспирант кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А.

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, начальник ОИМС Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Lapidus A.L. Production of alternative motor fuels based on natural gas / Lapidus A.L., Golubeva I.A., Krylov I.F., Zhagfarov F.G. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. No. 5. P. 305–312.
2. Lapidus A.L. Chemical processing of natural gas and gas condensate / Lapidus A.L., Zhagfarov F.G., Grigor'eva N.A., Khudyakov D.S., Kozlov A.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 141–147.
3. Kaddour O. Production of olefin and aromatic hydrocarbons by pyrolysis of gas condensate / Kaddour O., Sherbi A., Busenna A., Kolesnikov I.M. // Chemistry and technology of fuels and oils. 2009. Vol. 45. No.6. P. 440–442.
4. Malkov Yu.P. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas / Malkov Yu.P., Molchanov O.N., Britov B.K., Fedorov I.A. // Journal of engineering physics and thermophysics. 2016. Vol. 89. No.6. P. 1545–1553.
5. Ryabtsev I.I., Volkov A.E. Production of gas from liquid fuels for the synthesis of ammonia and alcohols. Moscow: Chemistry, 1968. 208 p.
6. Lavrov N.V., Kashirsky V.G., Lunkin V.N., Evlanov S.F., Popov A.I. Energometallurgical installation // C. of a. USSR No.461238. 1975. Bul. 7.
7. Batenin V.M., Maslennikov V.M., Tolchinsky L.S. Combined method of producing electric power and liquid synthetic fuels using gas turbine and combined-cycle plants // Patent of Russia No.2250872. 2005. Bul. 12.
8. Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N. Gas turbine and combined-cycle plants of thermal power plants. Moscow: Publishing house MEI, 2009. 584 p.
9. Sotnikov D.G., Mrakin A.N. Program for calculating the reactor of partial oxidation of fuel // Program for computer No. 2017615007. 2017.

© *А.Н. Мракин, Д.Г. Сотников, О.В. Афанасьева*

9. Mrakin A.N., Sotnikov D.G., Selivanov A.A. Construction of a calculation model for determining the geometric dimensions of a partial fuel oxidation reactor // Problems of improving the fuel and energy complex: coll. sci. tr. Issue. 8. Perfection of power systems and heat-and-power complexes: materials XIII Intern. scientific and technical. conf. Saratov: IP Beglakova E.S., 2016. P. 318–322.

Authors of the publication

Anton N. Mrakin – Cand. Sci. (Techn.), associate professor of Industrial Heating Engineering, Saratov State Technical University Gagarin Yu.A.

Dmitry G. Sotnikov – post-graduate student of Industrial Heating Engineering, Saratov State Technical University Gagarin Yu.A.

Olga V. Afanaseva – Cand. Sci. (Techn.), Head of innovation and international communication department, Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

5 сентября 2017 г.



УДК 536.242

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК

А.С. Красношлыков, Г.В. Кузнецов

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
krasnas@tpu.ru

Резюме: Проведен численный анализ процесса формирования температурных полей в результате выделения Джоулева тепла в сегменте типичной литий-ионной аккумуляторной батареи. Использовались программные пакеты ANSYS Electric и ANSYS Fluent. При математическом моделировании учитывались конвективный и кондуктивный механизмы теплопереноса и выделение тепловой энергии при прохождении электрического тока через материал пластин батареи. В результате численного моделирования установлены температуры электролита аккумулятора при прохождении токов, близких к предельно допустимым. Получены характерные распределения температур в исследуемой области. Выделен критический режим работы аккумулятора при нерегламентных токовых нагрузках.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, теплоперенос, Джоулево тепло, математическое моделирование, конвекция, теплопроводность.

Благодарности: Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (Конкурс НШ-2016), № НШ-7538.2016.8.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELDS OF THE LITHIUM-ION BATTERY UNDER CONDITIONS OF HIGH CURRENT LOADS

A.S. Krasnoshlykov, G.V. Kuznetsov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
krasnas@tpu.ru

Abstract: A numerical analysis of the formation of temperature fields as a result of the Joule heat release in a segment of a typical lithium-ion battery has been carried out. Software packages ANSYS Electric and ANSYS Fluent were used. At mathematical modeling of convective and conductive mechanisms of heat transfer and the release of thermal energy during the passage of electric current through the material of the plates of the battery were taken into account. As a result of the numerical simulation, the electrolyte temperatures of the accumulator are established when passing currents close to the maximum permissible. Temperature distributions in the investigated region have been obtained.

Keywords: Lithium-ion battery, heat transfer, Joule heat, mathematical modeling, convection, thermal conductivity.

Acknowledgments: *The reported research was supported by Russian Federation President Grant for state support of the Russian Federation leading scientific schools SS-7538.2016.8 (No.14.Y31.16.7538-SS).*

Введение

Использование аккумуляторных батарей в качестве аварийных источников электроэнергии летательных аппаратов сопряжено с такими эксплуатационными требованиями, как запуск вспомогательной силовой установки, работа тормозной системы, функционирование систем управления и др. [1]. При этом происходит значительный рост тока нагрузки [1]. В результате увеличивается температура батареи и возможен эффект теплового разгона (увеличение температуры электролита, приводящее к росту зарядного тока, который впоследствии способен достичь значения, близкого к значению тока короткого замыкания) [2]. При этом происходит частичное или полное разрушение аккумуляторной батареи [2, 3].

Несколько аварийных ситуаций на самолетах компании *Boeing* в 2013 году [4, 5] подтверждают актуальность этой научно-технической проблемы.

Следует отметить, что при проектировании типичной литий-ионной аккумуляторной батареи необходимо учитывать как выделение тепла в результате электрохимических реакций, так и выделение теплоты при прохождении электрического тока через пластины, обусловленное омическим нагревом (Джоулево тепло) [3].

Большинство экспериментов с аккумуляторами сводится, по существу, к определению температуры поверхности последних при определенных условиях их использования и к оценке работоспособности конкретного варианта конструкции источника тепловыделения [6]. Следует отметить, что проведение экспериментальных исследований по этой проблеме также затруднено в связи с требованием герметичности исследуемого устройства и малой ($7 \cdot 10^{-5}$ м) [7] толщины пластин и сепаратора. Для решения такого рода сложных задач наиболее целесообразным является применение методов математического моделирования процессов теплопереноса в материале твердых пластин и сепараторе аккумуляторной батареи, основанных на решении систем уравнений переноса массы, импульса и энергии [8–12] с учетом выделения Джоулева тепла.

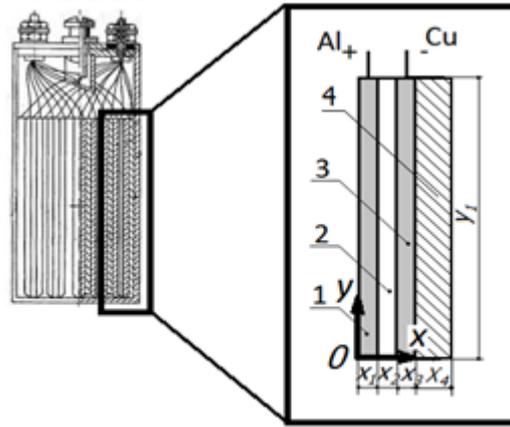
Цель работы – численное исследование распределений температур в аккумуляторе в условиях интенсивного тепловыделения, обусловленного высокими токовыми нагрузками.

Постановка задачи

Рассматривается типичный сегмент литий-ионного аккумулятора, включающий медную и алюминиевую пластины, слой электролита между ними и твердую стенку исследуемого устройства. Область решения показана на рис.1. В связи с идентичностью каждой секции аккумулятора можно обоснованно ограничиться при постановке задачи рассмотрением одной секции, граничащей со стенкой корпуса (рис. 1, б).

В общем случае в рассматриваемой системе теплоперенос осуществляется за счет термогравитационной конвекции и теплопроводности. При малых толщинах слоев электролита процессами естественной конвекции можно пренебречь. Но для такого упрощения необходимы достаточные основания. Поэтому при постановке задачи учитывались процессы не только теплопроводности в электродах, электролите и стенке корпуса аккумулятора, но также и свободная конвекция в слое гексафторфосфата лития (LiPF_6).

При постановке задачи не учитывалось возможное выделение тепла в результате экзотермических химических реакций электролита и материала электродов.



а)

б)

Рис. 1. а) общий вид области решения; б) рассматриваемый сегмент аккумулятора. 1 – положительный электрод (алюминиевая пластина); 2 – жидкий электролит (LiPF₆); 3 – отрицательный электрод (медная пластина); 4 – стенка аккумулятора (полипропилен)

Джоулево тепло вычислялось с использованием метода векторного потенциала [13]:

$$Q^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{J_{ii}\} \cdot \{J_{ii}\},$$

где Q^j – мощность выделения тепла в единице объёма, Вт/м³; n – количество точек интегрирования; $[\rho]$ – матрица сопротивления; $\{J_{ii}\}$ – суммарная плотность тока в элементе при интеграции точки i .

Предполагалось, что тепловыделение в пластинах распределено равномерно по направлениям x и y .

Уравнения неразрывности, движения и энергии для слоя жидкого электролита:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 u_2)}{\partial y} = \\ & = \rho_2 g_x - \frac{\partial P_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2 v_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2 v_2)}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial P_2}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho_2 C_{p2} \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности для пластин и стенки аккумулятора:

$$\rho_1 C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right); \quad (5)$$

$$\rho_3 C_{p3} \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right); \quad (6)$$

$$\rho_4 C_{p4} \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

где u, v – составляющие вектора скорости в проекции на оси x, y , соответственно; P – давление; T – температура; ρ – плотность; x, y – декартовы координаты; t – время; C_p – теплоемкость; g – ускорение свободного падения; λ – коэффициент теплопроводности; μ – динамическая вязкость; индексы 1, 2, 3, 4 – соответствуют алюминию, электролиту, меди и полипропилену.

Начальные условия для системы уравнений (1–7) заданы в виде:

$$u(x,y)=0; T(x,y)=T_0; P(x,y)=P_0.$$

Граничные условия для уравнений (1–7) имеют вид:

$$\begin{aligned} x = 0, 0 < y < y_1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} &= 0; \\ x = x_1, 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases}, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ x = x_1 + x_2, 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_2 = T_3 \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \end{cases}, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ x = x_1 + x_2 + x_3, 0 < y < y_1 \quad \begin{cases} T_3 = T_4 \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \end{cases}; \\ x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4, 0 < y < y_1 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = a(T_4 - T_{OC}); \\ y = 0, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= 0; \\ y = 0, x_1 < x < x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ y = 0, x_2 < x < x_3 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= 0; \\ y = 0, x_3 < x < x_4 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= 0; \\ y = y_1, 0 < x < x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= 0; \\ y = y_1, x_1 < x < x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0, \begin{cases} u_2 = 0 \\ v_2 = 0 \end{cases}; \\ y = y_1, x_2 < x < x_3 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= 0; \\ y = y_1, x_3 < x < x_4 \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= 0. \end{aligned}$$

Анализ результатов

Проведено численное моделирование процессов теплопереноса при протекании постоянного тока через пластины аккумулятора (рис. 1) с использованием пакетов программ *ANSYS Electric* и *ANSYS Fluent*. Геометрические размеры области решения: высота пластин ($0 < y < y_1$) 140 мм, толщина каждого элемента (алюминиевой, медной пластин и слоя электролита) 0,5 мм, толщина стенки аккумулятора 2 мм [7].

Приняты следующие варианты силы тока нагрузки на аккумуляторную батарею: $I_n=50$ А, $I_n=60$ А, $I_n=70$ А [6]. В качестве электролита принят LiPF_6 [14, 15]. Температура термического разложения данного электролита составляет 125°C [16]. Но следует отметить, что уже при 60°C в объеме электролита происходят химические реакции, описанные в работах [3, 6], которые могут привести к тепловому разгону аккумуляторной батареи.

При малых поперечных размерах (относительно продольных) исследуемого сегмента аккумулятора визуализация полей температур затруднена, поэтому целесообразно рассматривать распределения температур по поперечной координате. На рис. 2 показано распределение температуры по оси x при различных условиях теплообмена на поверхности стенки корпуса аккумулятора. Из рис. 2, а видно, что при охлаждении поверхности исследуемого устройства ($\alpha=5$ Вт/м²·К) перепад температур (ΔT) составляет $0,2^\circ\text{C}$. При интенсификации теплообмена (рис. 2, б) с поверхности стенки корпуса аккумуляторной батареи ($\alpha=10$ Вт/м²·К) ΔT составляет $0,3^\circ\text{C}$. Отсутствие перепада температур в электротехнической части аккумулятора, представленной пластинами электродов и электролитом (I-III), обусловлено высокой теплопроводностью используемых материалов. Относительно низкий перепад по толщине твердой стенки (IV) объясняется тем, что корпус аккумуляторной батареи является термически тонким телом (число $Bi < 3$).

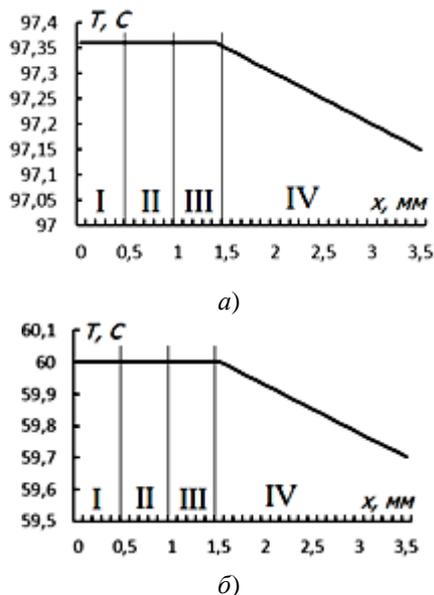


Рис. 2. Распределение температуры по оси x исследуемого устройства при $I_n=60$ А при различных условиях теплообмена на поверхности стенки корпуса аккумуляторной батареи: а) $\alpha=5$ Вт/м²·К; б) $\alpha=10$ Вт/м²·К. I –алюминиевая пластина, II – электролит, III – медная пластина, IV – стенка аккумулятора

На рис. 3 показана зависимость средней температуры электролита от времени при теплоизолированном корпусе аккумулятора. Видно, что при отсутствии охлаждения с поверхности стенки корпуса аккумулятора и токовой нагрузки выше номинального (>50 А) температура достигает критических значений (60°C) за 800 с. Следует отметить, что при

достижении температуры электролита выше 60°C вследствие недостаточного теплоотвода от батареи в окружающую среду, возникает риск разгерметизации аккумулятора из-за испарения электролита и роста давления внутри корпуса. В результате возможно возникновение нештатной ситуации на борту воздушного судна.

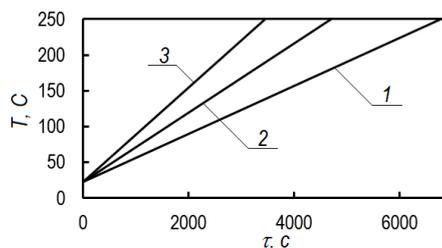


Рис. 3. Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (охлаждение отсутствует) I_n :
1 – 50, 2 – 60, 3 – 70 А

При охлаждении поверхности аккумулятора ($\alpha=5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ на границе $x=x_1+x_2+x_3$, $0 < y < y_1$) рост температуры электролита значительно замедляется. До постоянного, по существу, значения температура поднимается за 8000 с (рис. 4). При рассматриваемых вариантах токовой нагрузки 50, 60 и 70 А и коэффициенте теплоотдачи $5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ температура электролита в установившемся режиме выше номинальной и составляет 74,3; 97,3 и $124,5^{\circ}\text{C}$, соответственно.

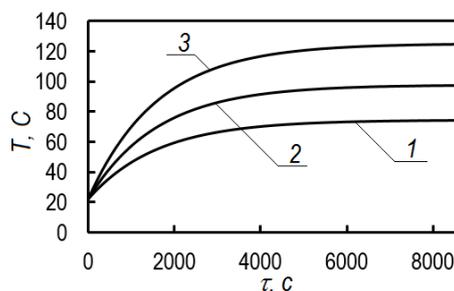


Рис. 4. Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (при $\alpha=5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$) I_n :
1 – 50; 2 – 60; 3 – 70 А

При интенсивной теплоотдаче с поверхности стенки корпуса аккумулятора ($\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$) температура электролита растет до значений выше регламентных только при токе нагрузки 70 А и составляет $73,7^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). При этом температура исследуемого устройства поднимается до установившегося режима за 4000 с.

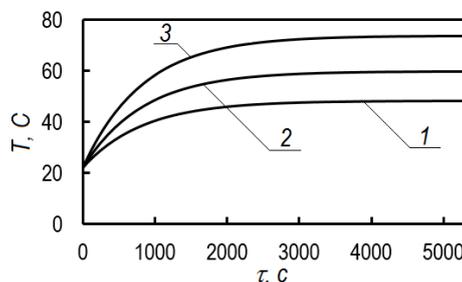


Рис. 5. Зависимость температуры сепаратора аккумулятора от времени при различной токовой нагрузке (при $\alpha=10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$), I_n :
1 – 50; 2 – 60; 3 – 70 А

Результаты выполненных исследований показывают, что даже в условиях достаточно интенсивного тепловыделения в пластинах электродов, обусловленного высокими токовыми нагрузками, можно обеспечить допустимый по регламенту эксплуатации аккумуляторных батарей уровень температур электролита за счет теплоотвода с внешней поверхности корпуса аккумулятора. При этом достаточно достижение коэффициента теплоотдачи с этих поверхностей $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

В практике использования аккумуляторных батарей летательных аппаратов создание сложных систем охлаждения (принудительное воздушное и водяное охлаждения), способных обеспечивать высокую интенсивность теплосъема (α более $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$), затруднено технико-экономическими условиями. Следует отметить, что существуют устройства простые по конструкции, и в то же время имеющие высокий коэффициент эффективной теплопроводности – термосифоны и тепловые трубки. Последние могут обеспечивать достаточно интенсивное охлаждение любых энергонасыщенных технических устройств, в том числе и аккумуляторных батарей воздушных судов.

Заключение

По результатам численного моделирования процессов конвективно-кондуктивного теплопереноса установлено, что увеличение интенсивности теплоотдачи с поверхности стенки корпуса аккумуляторной батареи в диапазоне изменения коэффициента α от 5 до $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ приводит к значительному снижению температур жидкого электролита (на 26°C при постоянной токовой нагрузке 50 А) по сравнению с условиями теплоизоляции по внешнему контуру корпуса аккумуляторной батареи. При $I_n=60$ и 70 А температура снижается в условиях охлаждения на 37 и 51°C соответственно.

При токовой нагрузке не более 60 А и коэффициенте теплоотдачи $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ температуры как поверхности аккумулятора, так и его электролита не превышают регламентных значений температур (60°C).

На основании анализа и обобщения результатов численного моделирования можно сделать вывод, что даже относительно умеренный теплоотвод с поверхности корпуса оказывает большое влияние на работоспособность аккумуляторной батареи. Особенно важным это становится при проектировании аккумуляторов, используемых как аварийные источники электроэнергии (например, аккумуляторные батареи воздушных судов) для режимов интенсивных нагрузок.

Литература

1. Брускин Д.Э., Синдеев И.М. Электроснабжение летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1988. 263 с.
2. Van Mierlo J., Maggetto G. Comparison of the environmental damage caused by vehicles with different alternative fuels and drive trains // *Automobile Engineering*. 2003. No. 36. P. 583–593.
3. Ahmadou Samba, Noshin Omar Development of an Advanced Two-Dimensional Thermal Model for Large size Lithium-ion Pouch Cells // *Electrochimica Acta*. 2014. No. 117. P. 246–254.
4. Rebecca Slayton, Graham Spinardi Radical innovation in scaling up: Boeing’s Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions // *Technovation*. 2016. No. 47. P. 47–58.
5. Tao Song, Yan LI, Jiashan Song, Zhao Zhang Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue // *Procedia Engineering*. 2014. № 80. P. 628–637.
6. Ребров С.Г., Янчур С.В., Мансуров В.С., Московкин С.А. Исследования литий-ионных аккумуляторов космического назначения на пожаровзрывобезопасность // «Труды МАИ». 2014. № 72.
7. Леонова Т.А., Дудник А.И., Михеев А.Е., Осипова И.В., Чурилов Г.Н. Разрядные характеристики литий-ионных аккумуляторов с углеродными электродами // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Ак. М.Ф. Решетнева*. 2012. № 4 (44). с. 25–27.
8. Oliveira J.L.G., Tecchio C., Paiva K.V., Mantelli M.B.H., Gandolfi R., Ribeiro L.G.S. Passive aircraft cooling systems for variable thermal conditions // *Applied Thermal Engineering*. 2015. V. 79. P. 88–97.

9. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // Measurement and Control. 2009. V. 42. No. 2. P. 44–47.
10. M. Sievers, U. Sievers, S.S. Mao, Thermal modelling of new Li-ion cell design modifications // Forschung im Ingenieurwesen. 2010. V. 74 (4). P. 215–231.
11. Botte G.G., Subramanian R.E., Mathematical modeling of secondary lithium batteries // Electrochimica Acta. 2000. V. 45. P. 2595–2609.
12. Inui Y., Kobayashi Y., Watanabe Y., Watase Y., Kitamura Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries // Energy Conversion and Management. 2007. V. 48 (7). P. 2103–2109.
13. Ansys Help. FLUENT Theory Guide.
14. Forgez C., Vinh Do D., Friedrich G., Morcrette M., Delacourt C. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery // Journal of Power Sources. 2010. V. 195 (9). P. 2961–2968.
15. Chunsheng Wang and Jian Hong Ionic Electronic Conducting Characteristics of LiFePO₄ Cathode Materials // Electrochemical and Solid-State Letters. 2007. V. 10 (3). P. 65–69.
16. Reza Younesi, Gabriel M. Veith, Patrik Johansson, etc Lithium salts for advanced lithium batteries: Li–metal, Li–O₂, and Li–S // Energy & Environmental Science. 2015. V. 8. P. 1905.

Авторы публикации

Красношлыков Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Теоретическая и промышленная теплотехника» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузнецов Гений Владимирович – д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Теоретическая и промышленная теплотехника» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

References

1. Bruskin D.Je., Sindeev I.M. Jelektrosnabzhenie letatel'nyh apparatov. M.: Vysshaja shkola, 1988. 263 p.
2. Van Mierlo J., Maggetto G. Comparison of the environmental damage caused by vehicles with different alternative fuels and drive trains // Automobile Engineering. 2003. No. 36. P. 583–593.
3. Ahmadou Sambaa, Noshin Omar Development of an Advanced Two-Dimensional Thermal Model for Large size Lithium-ion Pouch Cells // Electrochimica Acta. 2014. No. 117. P. 246–254.
4. Rebecca Slayton, Graham Spinardi Radical innovation in scaling up: Boeing's Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions // Technovation. 2016. No. 47. P. 47–58.
5. Tao Song, Yan LI, Jiashan Song, Zhao Zhang Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue // Procedia Engineering. 2014. No. 80. P. 628–637.
6. Rebrov S.G., Janchur S.V., Mansurov V.S., Moskovkin S.A. Issledovanija litij-ionnyh akkumuljatorov kosmicheskogo naznachenija na pozharovzryvobezopasnost' // «Trudy MAI». 2014. No. 72.
7. Leonova T.A., Dudnik A.I., Miheev A.E., Osipova I.V., Churilov G.N. Razrjadnye harakteristiki litij-ionnyh akkumuljatorov s uglerodnymi jelektrodami // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. Ak. M.F. Reshetneva. 2012. No. 4 (44). P. 25–27.
8. Oliveira J.L.G., Tecchio C., Paiva K.V., Mantelli M.B.H., Gandolfi R., Ribeiro L.G.S. Passive aircraft cooling systems for variable thermal conditions // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 79. P. 88–97.
9. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // Measurement and Control. 2009. V. 42. No. 2. P. 44–47.
10. M. Sievers, U. Sievers, S.S. Mao, Thermal modelling of new Li-ion cell design modifications // Forschung im Ingenieurwesen. 2010. V. 74 (4). P. 215–231.
11. Botte G.G., Subramanian R.E., Mathematical modeling of secondary lithium batteries // Electrochimica Acta. 2000. V. 45. P. 2595–2609.

12. Inui Y., Kobayashi Y., Watanabe Y., Watase Y., Kitamura Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries // Energy Conversion and Management. 2007. V. 48 (7). P. 2103–2109.

13. Ansys Help. FLUENT Theory Guide.

14. Forgez C., Vinh Do D., Friedrich G., Morcrette M., Delacourt C. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery // Journal of Power Sources. 2010. V. 195 (9). P. 2961–2968.

15. Chunsheng Wang and Jian Hong Ionic Electronic Conducting Characteristics of LiFePO₄ Cathode Materials // Electrochemical and Solid-State Letters. 2007. V. 10 (3). P. 65–69.

16. Reza Younesi, Gabriel M. Veith, Patrik Johansson, etc Lithium salts for advanced lithium batteries: Li–metal, Li–O₂, and Li–S // Energy & Environmental Science. 2015. V. 8. P. 1905.

Authors of the publication

Krasnoshlykov Alexander Sergeevich – post-graduate student of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering. Energy Institute of the State Educational Institution of Higher Professional Education "National Research Tomsk Polytechnic University".

Kuznetsov Genii Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering. Energy Institute of the State Educational Institution of Higher Professional Education "National Research Tomsk Polytechnic University".

Поступила в редакцию

14 июля 2017 г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.315.175

УСТРОЙСТВО ВИДЕОИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ГАБАРИТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОЛЕДЕНЕНИЯ ЛЭП

А.А. Шилин, С.С. Дементьев

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия
eltech@vstu.ru

Резюме: Долговременное бесперебойное электроснабжение потребителей требует «интеллектуализации» существующих электрических сетей. Одним из этапов создания «умной» сети является оснащение воздушных линий электропередачи устройствами автоматического сбора информации о гололёдообразовании. В статье предложен алгоритм мониторинга оледенения воздушных ЛЭП посредством онлайн-видеоизмерения габарита фазных проводов. Представлен вариант технической реализации соответствующего устройства и сделан вывод о целесообразности его применения.

Ключевые слова: надёжность электроснабжения, интеллектуальные сети, мониторинг ЛЭП, видеоизмерения, диагностика оледенения.

SAG VIDEO MEASUREMENT DEVICE FOR EVALUATION OF OHL ICING INTENSITY

A.A. Shilin, S.S. Dementyev

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
eltech@vstu.ru

Abstract: The long-term trouble-free electricity supply to consumers requires the intellectualization of existing power grids. The one the stages of the creation of smart grid is to equip the overhead power lines with devices for automatically collecting information on ice formation. The article proposes the algorithm for OHLs icing monitoring by means of online video measurement of a phase conductor sag. A variant of the technical implementation of the given device is presented and a conclusion about the expediency of its application is made.

Keywords: reliability of power supply, smart grids, OHL monitoring, video measurements, icing diagnostics.

Введение

В настоящее время реализация политики энергосбережения и энергоэффективности, в совокупности с увеличением темпов роста реального сектора экономики, диктует принципиально иные требования к организации энергообеспечения, что приводит, в частности, к постепенному отказу от наращивания генерирующих мощностей в пользу обеспечения долгосрочного, бесперебойного электроснабжения потребителей с минимальными эксплуатационными издержками. В этой связи наиболее многообещающим выглядит создание «интеллектуальной» электрической сети (*smart grid*), представляющей собой единую автоматизированную систему, которая позволит контролировать режимы работы всех участников процессов выработки, передачи и потребления электроэнергии [1, 2]. При этом, так как основным источником аварий в сети электроснабжения являются именно воздушные линии, одним из первых шагов на пути развёртывания *smart grid* может стать оснащение ЛЭП устройствами непрерывной диагностики состояния. В нашей стране особая уязвимость воздушных линий электропередачи объясняется эксплуатацией в условиях экстремального метеорологического воздействия, что, вкупе со значительным физическим износом самих ЛЭП, приводит к массовому обрыву проводов и падению линейных опор в гололёдный период [3].

Оценка интенсивности оледенения

На сегодняшний день большинство устройств диагностики состояния ЛЭП реализуют тензометрические методы измерения гололёдных нагрузок и требуют значительного изменения конструкции линий ввиду установки силоизмерительных датчиков. Высокая стоимость и сложность монтажа привели к относительно малому распространению данных устройств даже в условиях их объективной необходимости [4], в связи с чем поиск новых принципов количественной оценки гололёдообразования на ЛЭП остаётся актуальным.

Помимо прямого измерения веса гололёдных отложений очевидным показателем оледенения проводов является уменьшение их габарита Γ до земли и, соответственным образом, увеличение стрелы провеса f (рис. 1), т.к.

$$\Gamma = H - f,$$

где H – высота подвеса провода. При этом линия провисания провода с достаточной точностью аппроксимируется уравнением идеально гибкой нити, имеющим в данном случае вид [5]

$$y(x) = \Gamma \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{\Gamma}\right) - 1 \right).$$

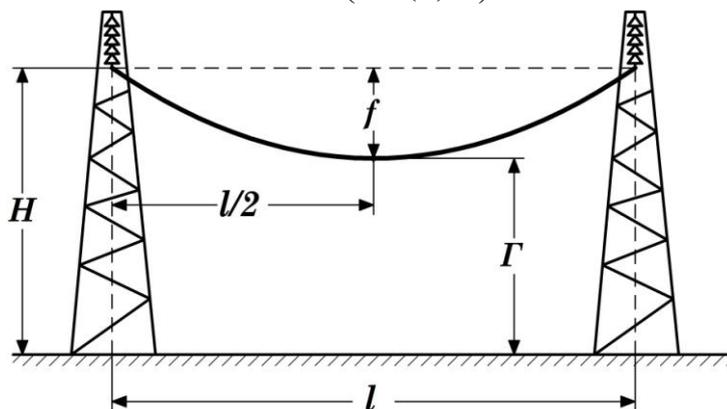


Рис. 1. Параметры линейного пролёта

Отметим, что значение длины L' провода от его нижней точки (с ординатой Γ) до точки с текущими координатами x и y определяется выражением [5]

$$L' = \Gamma \cdot \sin h\left(\frac{x}{\Gamma}\right),$$

которое, после разложения в ряд Маклорена, примет вид

$$L' = x + \frac{x^3}{3!\Gamma^2} + \frac{x^5}{5!\Gamma^4} + \dots \quad (1)$$

Из формулы (1) очевидным образом следует, что полная длина L провода в пролёте найдётся как

$$L = l + \frac{l^3}{24 \cdot \Gamma^2} + \frac{l^5}{1920 \cdot \Gamma^4} + \dots,$$

где l – длина пролёта.

Изменение механических нагрузок, действующих на провод, а также вариация его нагрева проходящим током и окружающей средой приводят к изменению длины провода, текущее значение которой (в i -й момент времени) соотносится с предыдущим следующим образом [6]:

$$L_i = L_{i-1} \left(1 + \Delta\varepsilon_y + \Delta\varepsilon_t\right), \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon_y$, $\Delta\varepsilon_t$ – приращения, соответственно, упругих и температурных деформаций. При этом из литературы [6] известно, что

$$\Delta\varepsilon_y = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{E}, \quad (3)$$

где σ – механическое напряжение в материале провода; E – модуль Юнга, а величина

$$\Delta\varepsilon_t = \alpha(t_i - t_{i-1}), \quad (4)$$

где α – температурный коэффициент линейного удлинения; t – нагрев провода.

Выражая из (2) величину приращения упругой деформации и подставляя (3), (4) в данное уравнение, получим:

$$\sigma_i - \sigma_{i-1} = E \left(\frac{L_i}{L_{i-1}} - \alpha(t_i - t_{i-1}) - 1 \right). \quad (5)$$

Заметим, что механическое напряжение σ , удельная нагрузка γ на провод и стрела его провисания f связаны между собой формулой [6, 7]:

$$f = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma}. \quad (6)$$

Тогда, выражая из (6) величину σ и подставляя в выражение (5), после ряда элементарных преобразований получим уравнение для расчёта текущей механической нагрузки на провод:

$$\gamma_i = f_i \left(\frac{8 \cdot E}{l^2} \left(\frac{L_i}{L_{i-1}} - \alpha(t_i - t_{i-1}) - 1 \right) + \frac{\gamma_{i-1}}{f_{i-1}} \right).$$

Также очевидно, что полная нагрузка γ_i складывается из удельных нагрузок от собственного веса провода $\gamma_{\text{пр}}$ и изменяющегося веса гололёдной муфты $\gamma_{\text{ГМ}(i)}$:

$$\gamma_i = \gamma_{\text{пр}} + \gamma_{\text{ГМ}(i)}. \quad (7)$$

Известно [7], удельная нагрузка на провод диаметром $d_{\text{пр}}$ и сечением S от веса гололёдной муфты плотностью $g_0=900 \text{ кг/см}^3$ диаметром $d_{\text{ГМ}}$ определяется как

$$\gamma_{\text{ГМ}} = \frac{\pi}{4} \left[(d_{\text{пр}} + d_{\text{ГМ}})^2 - d_{\text{пр}}^2 \right] \cdot \frac{g_0}{S}. \quad (8)$$

Объединяя уравнения (7), (8) и выражая величину текущего диаметра $d_{\text{ГМ}(i)}$ гололёдной муфты, получим

$$d_{\text{ГМ}(i)} = \sqrt{\frac{4S(\gamma_i - \gamma_{\text{пр}})}{\pi \cdot g_0} + d_{\text{пр}}^2} - d_{\text{пр}}.$$

При этом интенсивность нарастания (таяния) гололёдных отложений за промежутки времени $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ составит [8]:

$$V_i = \frac{d_{\text{ГМ}(i)} - d_{\text{ГМ}(i-1)}}{\tau_i - \tau_{i-1}}.$$

Необходимо подчеркнуть, что интенсивность образования отложений является ценным информационным параметром, т.к. позволяет объективно оценивать динамику изменения процесса в ближайшей перспективе и более корректным образом составлять карту плавки [4].

Из всего вышесказанного следует, что устройство для мониторинга интенсивности оледенения ЛЭП, использующее в качестве чувствительного параметра величину линейного габарита, должно функционировать по алгоритму, показанному на рис. 2.

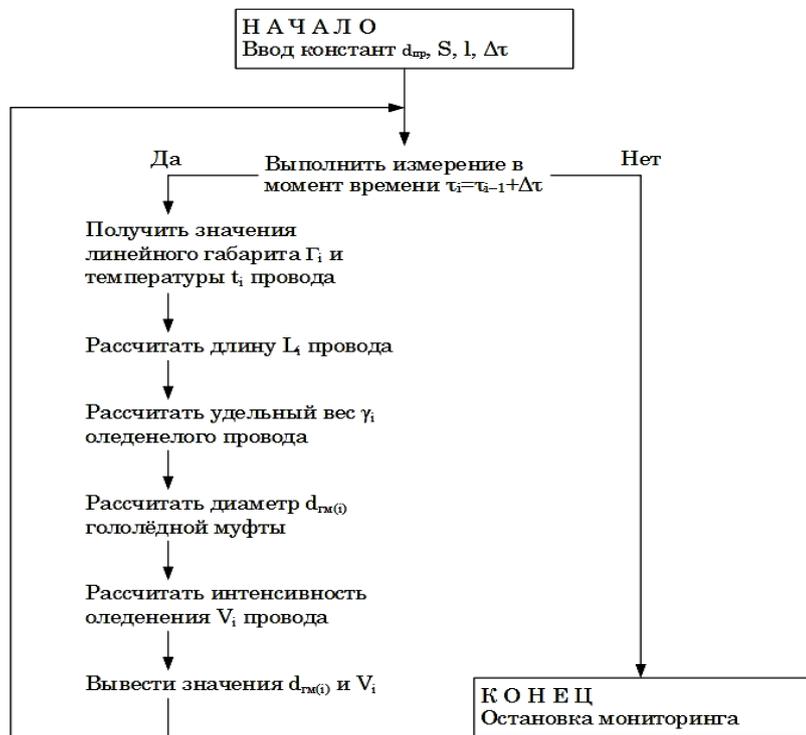


Рис. 2. Алгоритм мониторинга интенсивности оледенения

Устройство видеоизмерения габарита

Наиболее точный метод измерения провисания проводов заключается в вычислении по данным видеонаблюдения координат оптических меток, что подразумевает установку ПЗС-камеры с лазерной или инфракрасной подсветкой на теле опоры и маячков со светоотражающим покрытием (фликеров) на каждой фазе на расстоянии ~50 м от начала

пролёта (рис. 3).

Установка трёх оптических меток объясняется необходимостью мониторинга гололёдной нагрузки на всех проводах ЛЭП, что, в свою очередь, продиктовано неравномерностью оледенения фаз нижнего и верхнего ярусов [9].

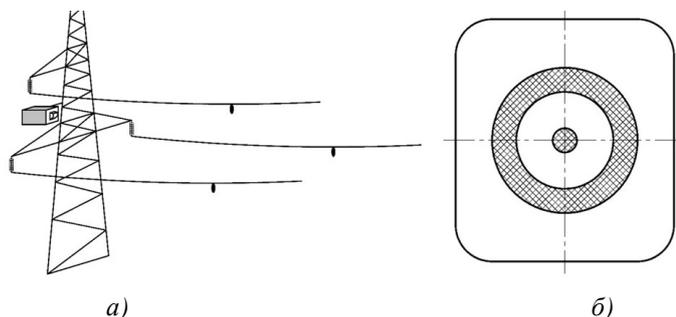


Рис. 3. Устройство видеорегистрации провисания проводов:
а) – внешний вид; б) – оптическая метка с кольцом светоотражающей ленты

В реальных условиях эксплуатации применение видеодатчика габарита также потребует использования термокожуха, устройства для стабилизации горизонтального положения, системы обогрева и очистки стекла.

Для мониторинга нагрева провода протекающим током нагрузки и окружающей средой предлагается использовать подвесной модуль измерения температуры (ПМИТ), включающий в себя соответствующий сенсор 1, микроконтроллер 2, Wi-Fi (ZigBee)-модем 3, а также устройство отбора мощности (УОМ) 4, зарядное устройство (ЗУ) 5 и аккумуляторную батарею (АКБ) 6, объединённые в едином корпусе 7 (рис. 4).

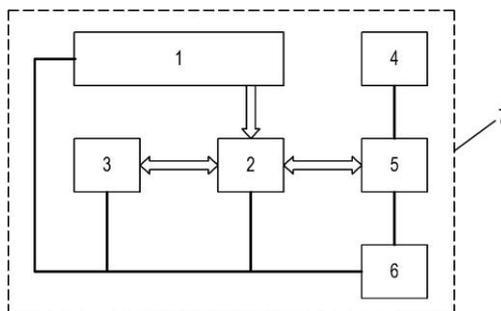


Рис. 4. Подвесной модуль измерения температуры провода

Видеорегистрация координат провода

Вычисление текущего габарита линии до земли (провисания) Γ , м, на основании изменения ординаты оптической метки на видеокadre ΔY , пикс, выполняется с использованием следующего выражения:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{\Delta Y}{N},$$

где Γ_0 – начальное значение клиренса провода, м; N – переводной коэффициент, пикс/м.

Определение координат маячка осуществляется путём поиска и распознавания на стоп-кадрах фрагмента, соответствующего полученному ранее эталонному изображению фликера. Для решения этой задачи предлагается использовать алгоритм корреляционного совмещения, который сводится к поиску максимума двумерной функции корреляции анализируемого изображения (F) и шаблона (W) [10].

Заметим, что в данном случае более предпочтительным выглядит использование нормированной кросскорреляционной функции (НККФ), автоматически нивелирующей яркостные различия двух изображений и имеющей вид [10]:

$$C(\alpha, \beta) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [W'(i, j) \cdot F'(\alpha + i, \beta + j)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [W'(i, j)]^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [F'(\alpha + i, \beta + j)]^2}},$$

при этом

$$W'(i, j) = W(i, j) - \frac{\sum \sum W(i, j)}{n \cdot m},$$

$$F'(\alpha + i, \beta + j) = F(\alpha + i, \beta + j) - \frac{\sum \sum F(\alpha + i, \beta + j)}{n \cdot m},$$

где α, β – номера строки и столбца корреляционной матрицы; N, M – размер изображения F ; n, m – размер изображения W .

Идеальное совпадение анализируемого фрагмента видеокadra и эталонного изображения оптической метки (рис. 3, б) будет иметь место при значении корреляции 1, полному различию будет соответствовать -1, а значение 0 засвидетельствует отсутствие корреляции между двумя изображениями.

Немаловажным является и то, что успешное определение пространственных координат провода возможно лишь при наличии у оптической метки уникальных внешних характеристик, благодаря чему не допускается фиксация объекта с идентичными свойствами на фоновой области видеоизображения.

Заключение

Предлагаемый алгоритм мониторинга интенсивности оледенения ЛЭП посредством контроля габарита проводов и оценки их удлинения является основополагающим при реализации соответствующего видеоизмерительного устройства, которое, ввиду потенциально более высоких метрологических характеристик (по причине исключительной помехоустойчивости оптического канала наблюдения), простоты монтажа на существующих линиях и дешевизны, представляет собой очевидную выгодную альтернативу аналогичным устройствам тензометрии гололёдных нагрузок.

Литература

1. Шилин А.А., Артюшенко Н.С., Дементьев С.С. «Умные» опоры воздушных линий электропередачи // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодёжи: матер. III российской молодёжной науч. школы-конф. (21–23 окт. 2015 г.) / Томск: Нац. исслед. Томский политехн. ун-т. 2015. С. 235–239.
2. Kabalci E., Kabalci Y. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids // Measurement science review. 2013. Vol. 13. No 5. 248–252 pp. DOI: 10.2478/msr-2013-0037.
3. Башкевич В.Я., Угаров Г.Г., Кузнецов П.А., Стебеньков С.Б. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях: монография. Саратов: СГТУ, 2013. 244 с.
4. Угаров Г.Г., Титов Д.Е. Системы мониторинга гололёдообразования и перспективы их совершенствования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №7. С. 52–29.
5. Power electronics handbook: devices, circuits and applications / edited by Muhammad H. Rashid. 3rd ed. 2011. 1410 p.
6. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.
7. Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. В 2 т. Т. 1.

Работа и расчёт проводов и тросов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 192 с.

8. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах: учеб. пособие. М.: МЭИ, 2007. 494 с.

9. Никитина И.Э., Абдрахманов Н.Х., Никитина С.А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Нефтегазовое дело. 2015. №3. С. 794–823. [Электронный ресурс]: http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p794-823_NikitinaIE_ru.pdf (дата обращения 04.04.2017)

10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

Авторы публикации

Шилин Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета.

Дементьев Сергей Сергеевич – аспирант кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета.

References

1. Shilin A.A. The "smart" towers of overhead power lines / A.A. Shilin, N.S. Artyushenko, S.S. Demytyev // Power engineering, electromechanics and energy-efficient technologies as viewed by youth: materials of III Russian Youth Scientific School-conf. (October 21-23, 2015) / Nat. Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2015. P. 235–239.

2. Kabalci E., Kabalci Y. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids // Measurement science review. 2013. Vol. 13. No 5. 248–252 pp. DOI: 10.2478/msr-2013-0037.

3. Monitoring of overhead power lines operating in extreme weather conditions: monograph / V. Ya. Bashkevich, G.G. Ugarov, P.A. Kuznetsov, S.B. Stebenkov. Saratov: SGTU, 2013. 244 p.

4. Ugarov G.G., Titov D.E. Ice formation monitoring systems and prospects for their improvement // Electrical equipment: operation and repair. 2014. No 7. P. 52–29.

5. Power electronics handbook: devices, circuits and applications / edited by Muhammad H. Rashid. 3rd ed. 2011. 1410 p.

6. Keselman L.M. Fundamentals of the overhead power lines mechanics. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 352 p.

7. Glazunov A.A. Fundamentals of the mechanical part of overhead power lines. In 2 parts. Part 1: The work and the calculation of wires and cables. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 192 p.

8. Diagnostics, reconstruction and maintenance of overhead power lines in the sleet areas / I.I. Levchenko, A.S. Zasyupkin, A.A. Aliluev, E.I. Satsuk. Moscow: MEI, 2007. 494 p.

9. Nikitina I.E., Abdrakhmanov N.Kh., Nikitin S.A. Methods of ice removing from the wires of electric power lines // Oil and Gas Engineering. 2015. No 3. 794–823 pp. Available at: http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p794-823_NikitinaIE_en.pdf (accessed 04/04/2017).

10. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. Moscow: Technosphere, 2005. 1072 p.

Authors of the publication

Aleksey A. Shilin – Cand. Sci. (Techn.), assistant professor, Department “Electrical engineering”, Volgograd State Technical University.

Sergey S. Demytyev – postgraduate student, Department “Electrical engineering”, Volgograd State Technical University.

Поступила в редакцию

14 июля 2017 г.

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
И ХИМИЧЕСКОЕ СРОДСТВО

В.Г. Киселёв

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
kis_vg@mail.ru

Резюме: В статье на базе модернизированной физико-химической модели «идеальный газ», предполагающей наличие у него химической энергии, и теории термодинамических потенциалов произведено исследование изотермического расширения идеального газа. Рассмотрение данного явления осуществлено как для обратимого, так и необратимого вариантов развития процесса, включая и такой его крайний случай, как расширение идеального газа в пустоту. В работе выявлена и обоснована возможность исследования процесса расширения идеального газа с использованием метода термодинамических потенциалов. На основе проведённого анализа получены результаты, аналогичные получаемым при исследовании данных процессов традиционным способом. С другой стороны, применение «химического» и «электрохимического» методов исследования позволило увеличить арсенал средств, используемых для изотермического расширения идеального газа, и получить адекватное объяснение эффектов локального нагрева и охлаждения и ряда других явлений, имеющих место при проведении классического опыта Гей-Люссака.

Ключевые слова: идеальный газ, изотермическое расширение идеального газа, термодинамический потенциал, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца.

THE ISOTHERMAL EXPANSION OF PERFECT GAS AND THE CHEMICAL AFFINITY

V.G. Kiselev

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia
kis_vg@mail.ru

Abstract: In the article on the base of the modernized physical chemistry model “the perfect gas” of the assuming the presence in it chemical energy and theory of thermodynamic potentials is produced a study of the isothermal expansion of perfect gas. The examination of this phenomenon is realized both for that reversed and not reversed of the versions of the development of process, including this limiting case as the expansion of perfect gas into the void. In the work, the possibility of investigating the process of expanding the perfect gas with the use of a method of thermodynamic potentials is revealed and substantiated. On the basis of the analysis conducted are obtained the results analogous obtained with a study of the data of processes by traditional method. From other side the application “chemical” and “electrochemical” methods of study made it possible to increase the arsenal of the means of those utilized for the isothermal expansion of perfect gas and to obtain the adequate explanation of the effects of local heating and cooling and number of other phenomena, which occur with conducting of the classical experience of Gay-Lussac.

Keywords: *perfect gas, the isothermal expansion of perfect gas, thermodynamic potential, energy of Gibbs, Helmholtz's energy.*

Введение

В соответствии с определением, сформулированным в 1834 году Клапейроном и представленным, в частности, в классической монографии М.Х. Карапетьянца [1, стр. 124], «Идеальный газ характеризуется отсутствием межмолекулярных сил и исчезающе малым объёмом молекул по сравнению с объёмом, занимаемым газом. Состояние идеального газа является предельным гипотетическим состоянием всех тел при достаточно низких давлениях и высоких температурах.

Из определения следует, что идеальный газ обладает только кинетической энергией, которая не зависит от объёма. При этом следует отметить, что состояние идеального газа может быть достигнуто, например, для гелия и при температурах достаточно низких.

Вместе с тем, тот же автор и в той же монографии [1, с. 140] пишет: «Например, изменение изобарного потенциала при изотермическом процессе в соответствии с уравнением $(\partial G/\partial p)_T = v$ будет равно $\int_1^2 v dp$. Но для отыскания этого интеграла необходимо подставить в подынтегральное выражение зависимость v от p или же p от v . Для идеального газа эта задача решается очень просто, так как в соответствии с уравнением Клапейрона-Менделеева

$$\Delta G_T = RT \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Иначе обстоит дело с реальным газом ...». Здесь ΔG_T — изменение изобарного потенциала при изотермическом процессе расширения газовой системы.

Последнее выражение легко трансформируется к следующему виду [1, с. 143]:

$$G_T = G_0 + RT \ln p,$$

где G_0 — стандартное значение энергии Гиббса идеального газа при абсолютной температуре T , а G_T — изобарный потенциал идеального газа при абсолютной температуре T .

Следовательно, можно утверждать, что идеальный газ подлежит исследованию и с помощью понятия «энергия Гиббса», которое тесно связано с понятиями «химическое сродство» и «термодинамические потенциалы», то есть признать, что он обладает некоторой химической энергией. В данной работе сделана попытка дальнейшего расширения применения понятия «химическое сродство» для анализа простейших процессов технической термодинамики с использованием метода термодинамических потенциалов и объяснение с данных позиций процесса изотермического расширения идеального газа. Второй целью данной статьи является косвенное подтверждение правильности основных принципов, положенных в основу более раннего исследования по близкой тематике, опубликованного в статье под названием «Парадокс Гиббса и его решение» [2], и значимости ряда схожих публикаций, посвящённых данной теме [3, 4]. Предложенный способ позволяет, по мнению автора, объяснить изотермическое расширение идеального и реального газа с позиций химической термодинамики и, тем самым, открывает новые «химические» и «электрохимические» возможности для анализа базовых термодинамических процессов, что мы попытаемся доказать в следующих разделах данной статьи.

Изотермическое расширение идеального газа

Сейчас и далее в целях упрощения изложения материала будем считать, что в эксперименте участвует один моль идеального газа. При изотермическом его расширении в соответствии с сегодняшними представлениями, господствующими в данной области термодинамики, можно выделить два противоположных варианта развития данного процесса в отношении осуществления сторонней работы, а именно — обратимое и

необратимое расширение идеального газа. Рассмотрим каждый из этих вариантов развития событий с точки зрения основных положений химической термодинамики.

Изотермическое обратимое и необратимое расширение идеального газа

В случае отсутствия потерь при осуществлении цикла Карно работа W_{AB} , совершённая системой над окружающей средой, определяется следующим выражением [5, с. 84]:

$$W_{AB} = \int_{v_A}^{v_B} p dv = RT \ln \frac{v_B}{v_A}, \quad (1)$$

где v_A – исходный объём газа; v_B – конечный объём газа; p – давление газа; v – изменяющийся объём газа в процессе его расширения; R – универсальная газовая постоянная.

При этом варианте развития событий сторонняя работа будет максимальной при квазистатическом протекании процесса и наличии противодействия со стороны окружающей среды, равного давлению рассматриваемой системы в каждый данный момент времени (обратимое расширение газа). В соответствии, например, с монографией И. Пригожина [5, с. 84]: «В таком изотермическом процессе теплота поглощается из резервуара. Так, как внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры, энергия газа не изменяется. Вся совершённая работа равна поглощённой теплоте. Следовательно, поглощённая из резервуара теплота Q_{AB} удовлетворяет соотношению

$$Q_{AB} = W_{AB} \text{.} \quad (2)$$

Вместе с тем, тот же самый процесс подлежит исследованию и с помощью техники термодинамических потенциалов. Действительно, М.Х. Карапетьянц указывает [1, стр. 98]: «...изменение изохорного потенциала в общем случае выражается уравнением

$$dF = -SdT - pdv - \delta A_{\max}^* \text{,} \quad (3)$$

где S – энтропия системы, а δA_{\max}^* – так называемая максимальная полезная работа.

В нашем случае при расширении идеального газа по изотерме цикла Карно единственной сторонней работой, совершаемой термодинамической системой, является объёмно-механическая работа, что позволяет нам записать следующее соотношение:

$$dF = -pdv \text{.} \quad (4)$$

Правую часть последнего уравнения, определяющую максимальную полезную объёмно-механическую работу ΔA_{\max} (при отсутствии δA_{\max}^*), при обратимом осуществлении процесса можно представить в следующем (интегральном) виде:

$$\Delta A_{\max} = RT \ln \frac{v_B}{v_A} \text{.} \quad (5)$$

Соотношение (3) и соотношение (5) приводят, при постоянстве температуры, к следующей интегральной величине изменения термодинамического потенциала Гельмгольца:

$$\Delta F_{AB} = -RT \ln \frac{v_B}{v_A} \text{.} \quad (6)$$

Таким образом, как это и следует из теории термодинамических потенциалов, изменение энергии Гельмгольца идеального газа (6) равно и противоположно по знаку работе, совершённой системой в обратимых изотермических условиях (формулы (4) и (5)). Иными словами, при постоянстве температуры наблюдаемое изменение энергии Гельмгольца целиком превращается в стороннюю объёмно-механическую работу. Данное явление легко поддаётся объяснению и с использованием основных положений термодинамики химических реакций. Действительно в этом случае можно считать, что в закрытой системе, занимаемой идеальным газом, при движении поршня в сторону увеличения его объёма наблюдаются два противоположных процесса — процесс

разрежения идеального газа, протекающий практически во всём объёме системы, и процесс его концентрирования, протекающий в бесконечно малом объёме, прилегающем к бесконечно медленно движущемуся поршню. Если для определённости, не нарушая общности, принять, что в качестве идеального газа выступает водород, то для рассматриваемого интегрального процесса с участием, например, одного моля газа можно записать следующее уравнение:

$$H_2(v_A) \rightarrow H_2(v_B). \quad (7)$$

В то же время, применяя в качестве независимой переменной давление, что при использовании одного моля идеального газа практически равнозначно применению предыдущего соотношения, получаем:

$$H_2(p_A) \rightarrow H_2(p_B). \quad (8)$$

Изменение энергии Гельмгольца идеального газа в этом случае также определяется уравнением (6). А то количество тепла, которое получает система для осуществления изотермического процесса, делённое на абсолютную температуру, и которое по Р. Клаузиусу является изменением энтропии системы, равно изменению энтропии идеального газа в рассматриваемом квазистатическом процессе.

Этот процесс представлен практически в любом вузовском учебнике. Вот как его описывает, в частности, И. Пригожин [5, с. 90–91]: «В обратимом процессе, так как система и тепловой резервуар при обмене теплом имеют одинаковую температуру, изменение энтропии резервуара на любом этапе циклического процесса равно изменению энтропии системы, взятому с обратным знаком».

Ни в коем случае не оспаривая приведённую цитату, покажем, что данный процесс с позиции химической термодинамики может быть представлен и в следующем виде. В таком изотермическом процессе происходит уменьшение химического сродства ΔF_{AB} идеального газа от величины $-RT\ln v_A$ до величины $-RT\ln v_B$ с соответствующим изменением энтропии идеального газа ΔS_{AB} , которая растёт от величины $R\ln v_A$ до величины $R\ln v_B$ в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta S_{AB} = R \ln \frac{v_B}{v_A}. \quad (9)$$

Сторонняя работа совершается в изотермических условиях за счёт изменения термодинамического потенциала (энергия Гельмгольца). Изменение энергии Гельмгольца в рассматриваемом процессе равно и противоположно по знаку сторонней работе, что приводит к неизменности кинетической энергии молекул идеального газа (внутренняя (кинетическая) энергия идеального газа остаётся неизменной). Отсюда очевидно, что если изотермический процесс не является квазистатическим, например, в системе присутствует трение, то работа, совершаемая системой, будет меньше работы системы, совершаемой при протекании процесса в равновесных условиях, а изменение энтропии системы «идеальный газ» останется прежним, т. е. будет по-прежнему определяться формулой (9). Это повлечёт, в соответствии с соотношением (2), снижение поступления тепла от горячего резервуара на количество тепла, эквивалентное работе, затраченной на преодоление сил трения.

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что изменение свободной энергии Гельмгольца идеального газа в изотермических условиях равно максимальной объёмно-механической работе, совершаемой системой, при отсутствии других видов работ. В случае, если в рассматриваемой системе совершаются и другие виды работ, например работа на преодоление трения с соответствующим выделением тепла, то общее количество работы, включая и работу, затраченную на преодоление силы трения, которая сопровождается увеличением кинетической энергии молекул газа (тепловыделением), остаётся неизменным. В свою очередь, количество тепла, изымаемого из горячего резервуара, уменьшится на эту же величину, соответственно сократится и полезная (сторонняя) работа, совершаемая системой. При этом в случае, когда вся энергия Гельмгольца расходуется на преодоление

трения, то есть превращается в теплоту, очевидно, что из горячего резервуара тепло поглощаться не будет и не будет совершаться сторонняя объёмно-механическая работа, хотя характер изменения энергии Гельмгольца и энтропии идеального газа останется прежним.

Необратимое расширение идеального газа в пустоту

Рассмотрение вопроса расширения идеального газа в пустоту удобно начать с анализа опыта Гей-Люссака, проведённого им ещё в 1807 году, в котором он установил, что данный процесс не сопровождается интегральным тепловым эффектом. В рамках проведённого им эксперимента газ, находящийся под давлением в одном из сосудов, выпускался практически без трения в другой точно такой же эвакуированный сосуд. Опыты проводились с воздухом, водородом и углекислым газом. Вот как сам Гей-Люссак описывает полученные им результаты [6, с. 64–65]: «Следующая таблица содержит средние результаты шести опытов, которые я провёл с воздухом:

Давление воздуха, метры рт. ст.	0,76	0,38	0,19
Холод, произведённый в баллоне № 1, °С	0,61	0,34	0,20
Теплота, произведённая в баллоне № 2, °С	0,58	0,34	0,20

Мне кажется, что я имею достаточное право заключить: при переходе воздуха из одного баллона в другой, равной ёмкости и эвакуированный, изменения температуры в каждом баллоне равны». В свою очередь, анализируя данный опыт, И.Р. Кричевский [6, стр. 65] далее пишет: «После смешения обеих масс газа в двух баллонах температура расширенного газа будет равна первоначальной температуре газа, имевшего меньший объём».

Покажем, что признание наличия химической энергии у идеального газа и применение метода термодинамических потенциалов к анализу этого процесса позволяет несколько иначе взглянуть на суть данного явления. Действительно, если принять (без ограничения общности), что в качестве идеального газа выступает водород, то для рассматриваемого интегрального процесса, происходящего в баллоне, заполненном идеальным газом (баллон № 1, начальное давление воздуха в нём равно $p_A = p$), с участием, например, одного моля водорода, следует записать следующее уравнение:

$$\text{H}_2(p_A = p) \rightarrow \text{H}_2\left(\frac{p}{2}\right). \quad (10)$$

Тогда можно утверждать, что в сосуде, из которого газ удалён (баллон № 2, начальное давление воздуха в нём равно $p_B = 0$) и в который он поступает из баллона № 1, будет наблюдаться следующий химический процесс:

$$\text{H}_2(p_B = 0) \rightarrow \text{H}_2\left(\frac{p}{2}\right). \quad (11)$$

Эти две реакции протекают в эквивалентных количествах и в противоположных направлениях без совершения работы, поэтому следует ожидать (в случае неидеальности системы) некоторого теплового эффекта, противоположного по знаку в разных сосудах, которые должны компенсировать друг друга, что и наблюдается на практике (смотри соответствующие столбцы таблицы).

Таким образом, если рассматривать процесс расширения как химическую реакцию, то начальная энергия Гиббса для одного моля идеального газа G_A , находящегося в объёме v при давлении p , будет определяться следующим уравнением:

$$G_A = G^0 + RT \ln p. \quad (12)$$

Соответственно, энергия Гиббса одного моля идеального газа после расширения его в пустоту до объёма $2v$ составит величину G_B :

$$G_B = G^0 + RT \ln\left(\frac{p}{2}\right). \quad (13)$$

Таким образом, химическое сродство ΔG исходного компонента данной реакции по отношению к её продукту равно (это одно и то же вещество, имеющее разные концентрации) следующей величине:

$$\Delta G = G_B - G_A = -RT \ln 2. \quad (14)$$

Из курса химической термодинамики известно [1, с. 101], что изменение энергии Гиббса химической реакции ΔG определяется следующим соотношением:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (15)$$

где ΔH – изменение энтальпии реакции, а ΔS – изменение энтропии реакции.

Учитывая экспериментально установленный факт – отсутствие интегрального теплового эффекта при протекании данного процесса ($\Delta G = 0$), соотношение (15), а также постоянство температуры и отличие её от нуля, для энтропии расширения идеального газа в пустоту при выбранных нами условиях получаем:

$$\Delta S = R \ln 2. \quad (16)$$

Впрочем, тот же самый результат является и следствием анализа формулы (14) с учётом протекания двух эквивалентных противоположно направленных химических процессов расширения и концентрирования газа.

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что применение метода термодинамических потенциалов к процессу расширения реального газа в пустоту позволяет объяснить общеизвестный факт – отсутствие интегрального теплового эффекта в системе. Наряду с этим, он однозначно истолковывает и такие экспериментально наблюдаемые явления, как локальное изменение температуры газа в сосудах (принимающих участие в эксперименте) в противоположных направлениях, так и интегральное его отсутствие при малых давлениях газов. Это объясняется протеканием двух эквивалентных химических процессов в противоположных направлениях. С другой стороны, в соответствии с теорией термодинамических потенциалов, для идеальных газов при расширении их в пустоту как локальное, так и интегральное изменение температуры не наблюдается. Изменение термодинамического потенциала, энтропии и отсутствие работы в системе, определяемые с помощью метода термодинамических потенциалов, также соответствуют экспериментальным фактам. Более того, предложенный метод позволяет объяснить и некоторое отклонение от изложенных принципов, наблюдаемое в эксперименте с начальным максимальным давлением воздуха. Этот эффект интегрального охлаждения системы и неравномерности локальных изменений температуры в сосудах в противоположных направлениях (эксперимент с начальным максимальным давлением воздуха, равным 0,76 миллиметров ртутного столба в таблице) легко объясняется в рамках принятой нами концепции нелинейностью изменения летучести газа с изменением его давления.

Изотермическое расширение идеального газа с точки зрения электрохимии

В последние годы всё большее распространение в области энергетики получают технологии, опирающиеся на использование электрохимических процессов. Особенно широкое практическое применение они находят в области защиты от коррозии металлических конструкций вообще и энергетического оборудования в частности [7–11].

Опираясь на этот достаточно мощный аппарат электрохимии и то обстоятельство, что энергия Гиббса при постоянстве соответствующих параметров является функцией состояния системы и не зависит от пути процесса, для объяснения экспериментально наблюдаемых фактов при изотермическом расширении идеального газа можно провести следующий мысленный, а в случае необходимости и реальный эксперимент. Для его осуществления нам потребуется электрохимическая цепь, состоящая из двух газовых электродов. Пусть для конкретизации процесса, но без ограничения его общности, в данном устройстве используются два водородных электрода (электрод 1 и электрод 2), находящихся под разными давлениями водорода $p_A = p$ и $p_B = 0$. Причём оба они помещены в одинаковый электролит, например водный раствор соляной кислоты, и отделены друг от друга

перегородкой, проницаемой для ионов электролита, но способной выдержать разницу давлений водорода, равную $p_A - p_B$.

Кроме того, примем, что эти электроды помещены в одинаковые по объёму сосуды, левый из которых изначально находится под давлением $p_A = p$, а правый – под давлением $p_B = 0$. Объём каждого из рассматриваемых сосудов равен v за вычетом объёма твердых и жидких составляющих оставшейся части водородного электрода, которые мы принимаем одинаковыми как для правой, так и для левой части электрохимической системы, а количество водорода, участвующее в эксперименте, равно одному молю. В таком случае саму электрохимическую систему можно представить в следующем виде:



В процессе её работы на левом электроде будет протекать реакция электрохимического окисления водорода по следующей схеме:



В свою очередь, на правом электроде будет протекать в эквивалентных количествах противоположно направленная реакция восстановления ионов водорода:



Очевидно, что рассматриваемый процесс будет идти вплоть до выравнивания давлений p_A и p_B , что при принятых нами условиях соответствует общему давлению $p/2$. Кроме того, не менее очевидно, что при протекании двух одинаковых реакций в противоположных направлениях в эквивалентных количествах интегральный тепловой эффект будет практически отсутствовать. Это достигается линейностью изменения соответствующих коэффициентов летучести (при неидеальности системы), которую всегда можно получить путём сближения параметров p_A и p_B . Однако локальный тепловой эффект вполне возможен, что и подтверждается, в частности, экспериментом, проведённым более 100 лет назад по расширению воздуха в пустоту [6, с. 64–65].

Электродвижущая сила данной цепи будет определяться следующим уравнением [12, с. 194]:

$$E = \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_A}{p_B}, \quad (20)$$

где F – число Фарадея, а E – электродвижущая сила гальванического элемента.

После данных вводных замечаний проведём процесс расширения идеального газа из объёма v в совокупный объём $2v$ путем осуществления двух противоположно направленных электрохимических реакций в гальванической системе (17), предварительно поместив её в термостат; а также анализ данного процесса с использованием метода термодинамических потенциалов и понятия «энергия Гельмгольца» F . Как известно [1, стр. 101], в этом случае величина dF определяется выражением (3), где δA_{\max}^* – максимально возможная сторонняя полезная работа. В свою очередь, изменение термодинамического потенциала «энергия Гельмгольца», как видно из уравнения (3), при постоянной температуре и постоянном объёме определяется следующим выражением:

$$dF = -\delta A_{\max}^*. \quad (21)$$

В нашем случае сторонней работой системы является её электрическая работа, которую, в свою очередь, в интегральной форме можно вычислить, применяя соотношение, приведённое в монографии [12, с. 17]:

$$\Delta A_{\max}^* = 2EF. \quad (22)$$

В то же время, тот же автор [12, с. 194] пишет: «э.д.с. гальванической системы определяется механической работой, которую необходимо совершить при переходе одного моля газа от высокого давления p_A к низкому давлению p_B , что для наших условий

эквивалентно реализации уравнений (21) и (22). Таким образом, можно записать следующие два соотношения:

$$\Delta A_{\max} = RT \ln \frac{v_B}{v_A}, \quad (23)$$

$$\Delta F = -RT \ln \frac{v_B}{v_A}. \quad (24)$$

С другой стороны, при совершении сторонней электрической работы изменение энергии Гельмгольца определяется следующим соотношением:

$$\Delta F = -2FE. \quad (25)$$

Воспользуемся последним уравнением для анализа различных случаев изотермического расширения идеального газа, рассмотренных нами ранее, которые мы осуществим уже при помощи концентрационного газового гальванического элемента.

Процесс изотермического расширения идеального газа можно осуществить по следующим вариантам.

1. Равновесно и обратимо, например, с использованием электромотора и груза, который он поднимает за счёт химической энергии данной цепи, что эквивалентно изотермическому расширению идеального газа в цикле Карно, т. е. случаю получения максимальной работы в системе. При этом очевидно, что электромотор необходимо подключать к внешней цепи гальванического элемента.

2. Равновесно и необратимо при использовании бесконечно большого сопротивления в цепи элемента, что эквивалентно изотермическому расширению идеального газа в цикле Карно при отсутствии сторонней работы, когда вся энергия системы расходуется на преодоление трения.

3. Равновесно и необратимо при использовании, например, последовательно подключённого сопротивления и электродвигателя с грузом во внешней цепи электрохимического элемента, что эквивалентно изотермическому расширению идеального газа в цикле Карно при наличии внешней работы с трением, когда часть энергии системы расходуется на его преодоление, а другая её часть – на совершение сторонней работы. При этом следует отметить, что работа, затраченная на преодоление трения, проявляет себя в форме выделившегося тепла.

4. Полностью неравновесно и необратимо, когда система имеет нулевое электрическое сопротивление, в том числе и обусловленное поляризацией электродов, и не совершается никакая сторонняя работа, что эквивалентно открытию крана, соединяющего две равные ёмкости, в которые помещены правый и левый электроды, т. е. расширению идеального газа в пустоту.

Обсуждение результатов и выводы

Применение метода термодинамических потенциалов – достаточно распространённый и рутинный процесс, часто используемый в химической термодинамике. В то же время, вероятно по историческим причинам, он практически не применяется при анализе явлений, связанных с технической термодинамикой. Данную работу можно рассматривать в какой-то степени как продолжение опубликованной ранее статьи автора «Парадокс Гиббса и его решение» [2], в которой метод термодинамических потенциалов использован для анализа процесса смешения двух идеальных газов. Однако в данном тексте исследованию подлежит процесс обратимого и необратимого расширения идеального газа, включающий и такой крайний его вариант, как расширение идеального газа в пустоту. Следует отметить, что данные явления анализируются с трёх позиций:

- как часть цикла Карно;
- как «химический» процесс;
- как электрохимический процесс.

Использование для всех трёх случаев метода термодинамических потенциалов, как функции состояния системы, позволяет получить одинаковые результаты исследований для

всех рассматриваемых вариантов процесса расширения идеального газа и объяснить локальные изменения температуры, наблюдаемые в классическом опыте Гей-Люссака. Кроме того, следует отметить, что данная статья является и косвенным подтверждением справедливости предыдущей работы автора «Парадокс Гиббса и его решение», так как для получения результатов исследования применяется один и тот же метод.

Проведённая работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Признание факта наличия химической энергии у идеального газа при анализе процессов его расширения и использование метода термодинамических потенциалов позволяют получить результаты, совпадающие с результатами традиционного термодинамического анализа данных процессов.

2. «Химический» и «электрохимический анализ» процесса расширения идеального газа дают результаты, совпадающие с классическим вариантом анализа данного процесса.

3. Использование метода термодинамических потенциалов для анализа процесса расширения газов в пустоту, по сравнению с традиционным методом трактовки опыта Гей-Люссака, имеет следующие преимущества:

3.1. Позволяет объяснить локальные изменения температуры в разных сосудах, при использовании воздуха в эксперименте, наличием сил Ван-дер-Ваальса.

3.2. Позволяет объяснить отсутствие интегрального теплового эффекта при расширении воздуха в пустоту наличием двух противоположных химических процессов, протекающих с участием эквивалентных количеств вещества.

3.3. Позволяет объяснить нарушение принципа отсутствия интегрального теплового эффекта при расширении воздуха в пустоту при повышении давления в исходном сосуде – возрастающей нелинейностью изменения сил Ван-дер-Ваальса с ростом давления и, следовательно, соответствующей нелинейностью изменения коэффициентов летучести газовой системы.

Литература

1. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика: монография. М.-Л., Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1953. 611 с.
2. Киселёв В.Г. Парадокс Гиббса и его решение //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11–12. С. 129–137.
3. Хайгун С. История парадокса Гиббса: монография. Москва. Издательство: «Комкнига», 2016. 168 с.
4. Ігнатівич В.М. Аналіз парадокса Гіббса.// Наукові записки АН Вищої школи України. 2006. Т. 1. С. 32–37.
5. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: монография. М.: Мир, 2002. 461 с.
6. Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики: монография. М.: Изд-во «Химия», 1970. 439 с.
7. Kiselev V. G. Influence of the electric double-layer capacitance at the rate of corrosion at the phase interface / V.G. Kiselev, V.V. Sergeev, E.N. Rouzich // Corr. Rev. 2017. Vol. 35, Iss. 1. P. 47–51. DOI: 10.1515 / correv-2016-0049.
8. Киселев В.Г., Калютник А.А. Коррозия и защита от коррозии теплоэнергетического оборудования: монография. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического Университета, 2016. 272 с.
9. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung // 3R International. 2016. № 6. P. 40–45.
10. Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen // 3R International. 2016. № 6. P. 46–52.
11. Marius Fischer, Arnold Weber. Alternative Schutzstromversorgung in Verteilnetzen // 3RInternational. 2016. No. 6. P. 53–57.

12. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия: монография. М.: Изд-во «Высшая школа», 1975. 568 с.

Автор публикации

Киселев Владимир Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: kis_vg@mail.ru.

References

1. Karapet'janc M.H. Himicheskaja termodinamika: monografija. M.-L., Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury, 1953. 611 p.
2. Kisel'jov V.G. Paradoks Gibbsa i ego reshenie //Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2016. No. 11–12. P. 129–137.
3. Hajtun S. Istorija paradoksa Gibbsa: monografija. Moskva. Izdatel'stvo: «Komkniga», 2016. 168 p.
4. Ignatovich V.M. Analiz paradoksa Gibbsa.// Naukovi zapiski AN Vishhoi shkoli Ukraïni. 2006. Vol. 1. P. 32–37.
5. Prigozhin I., Kondepudi D. Sovremennaja termodinamika. Ot teplovyh dvigatelej do dissipativnyh struktur: monografija. M.: Mir, 2002. 461 p.
6. Krichevskij I.R. Ponjatija i osnovy termodinamiki: monografija. M.: Izd-vo «Himija», 1970. 439 p.
7. Kiselev V. G. Influence of the electric double-layer capacitance at the rate of corrosion at the phase interface / V.G. Kiselev, V.V. Sergeev, E.N. Rouzich // Corr. Rev. 2017. Vol. 35, Iss. 1. P. 47–51.DOI: 10.1515 / correv-2016-0049.
8. Kiselev V.G., Kaljutik A.A. Korrozija i zashhita ot korrozii teplojenergeticheskogo oborudovanija: monografija. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politehnicheskogo Universiteta, 2016. 272 p.
9. Ulrich Bette. Ergebnisse des Feldversuchens an einer durch Bahnwechselstrom beeinflussten Rohrleitung // 3R International. 2016. No. 6. P. 40–45.
10. Markus Büchler, David Joos. Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungen. 3R International // 2016. No. 6. P. 46–52.
11. Marius Fischer, Arnold Weber. Alternative Schutzstromversorgung in Verteilnetzen // 3RInternational. 2016. No. 6. P. 53–57.
12. Antropov L.I. Teoreticheskaja jelektrohimiya: monografija. M.: Izd-vo «Vysshaja shkola», 1975. 568 p.

Author of the publication

Vladimir Gennad'evich Kiselev – Dr. Sci. (Tech.), professor of the department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Поступила в редакцию

12 октября 2017 г.

К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ

УДК 621.314

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ ХЛОРИДА КОБАЛЬТА ДЛЯ ОСУШКИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

В.К. Козлов, Д.М. Валиуллина, Г.И. Ризванова

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В данной работе приведены результаты опытов по изучению возможности применения кристаллогидратов хлорида кобальта для осушки трансформаторных масел. Показано, что использование кристаллогидратов хлорида кобальта для осушки трансформаторных масел приводит к их полному обезвоживанию. Это происходит за счет взаимодействия между молекулами хлорида кобальта и воды. Для определения взаимодействия хлорида кобальта с маслом и водой были исследованы спектры поглощения в видимой и ближней ИК области при комнатной температуре в кюветах толщиной 10 мм в диапазоне длин волн λ 300–1000 нм. Показано, что независимо от количества добавленного хлорида кобальта спектры трансформаторного масла не изменяются и, следовательно, не изменяется химический состав масла. Это говорит о том, что хлорид кобальта никак не реагирует с трансформаторным маслом и в полном объеме остается на дне емкости с трансформаторным маслом. Данный метод более экономичен и менее «ресурсозатрачен».

Ключевые слова: трансформаторное масло, хлорид кобальта, шестиводный гидрат, осушка, взаимодействие, влагосодержание, титрование, вода, реагент.

POSSIBILITY OF APPLICATION OF CRYSTALHYDRATES OF COBALT CHLORIDE FOR DRYING TRANSFORMER OILS

D.M. Valiullina, V.K. Kozlov, G.I. Rizvanova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
valiullinadilya@mail.ru, vk_kozlov@bk.ru, Gulnaz_50@mail.ru

Abstract: This paper presents the results of experiments for studying the possibility of using crystalline cobalt chloride for drying of transformer oils. It is shown that the use of crystalline hydrates of cobalt chloride for the drying of transformer oils leads to their complete dehydration. This is due to the interaction between the molecules of cobalt chloride and water. To determine the interaction of cobalt chloride with oil and water, absorption spectra in the visible and near-IR region at room temperature were studied in cuvettes 10 mm thick in the wavelength range λ 300 ÷ 1000 nm. It is shown that, regardless of the amount of cobalt chloride added, the transformer oil spectra do not change and, consequently, the chemical composition of the oil does not change. This indicates that the cobalt chloride does not react with the transformer oil and remains in full at the bottom of the container with transformer oil. This method is more economical and less "resource-intensive".

Keywords: transformer oil, cobalt chloride hexahydrate, drying, reacting, moisture content titration, the water, the reagent.

Можно утверждать, что все вещества, независимо от их природы и агрегатного состояния, содержат в своем составе воду. В зависимости от природы ее связи с веществом различают воду: химически связанную, растворенную, кристаллизационную, эмульгированную, адсорбированную, окклюдируемую, капиллярную и др. Знать содержание различных форм воды в том или ином веществе необходимо сравнительно редко. В основном от этого зависят способы ее удаления, т.е. способы осушки вещества.

Одной из важнейших технологических операций обработки изоляции является вакуумная сушка активной части трансформатора после ее сборки и перед установкой в баке и заливкой маслом. Эта операция проводится для удаления влаги и газов из изоляции трансформатора с целью увеличения ее электрической прочности и уменьшения диэлектрических потерь; стабилизации размеров изоляционных деталей и увеличения электродинамической стойкости трансформатора при коротком замыкании; повышения надежности и увеличения срока службы трансформатора.

В процессе эксплуатации трансформаторов под действием кислорода воздуха, высокой температуры и других факторов залитые в них масла стареют, т.е. изменяются их химические и электрофизические показатели, в том числе увеличивается содержание воды в трансформаторном масле [1].

Различают следующие виды растворенной воды в трансформаторном масле.

1. Осажденная на дно резервуара вода. Она не представляет прямой опасности для пробивного напряжения масла, но недопустима, потому что указывает на присутствие растворенной воды.

2. Растворенная вода. Растворенная вода сильно снижает пробивное напряжение и попадает в масло обычно из воздуха. Она свидетельствует о загрязнении масла и может быть частично удалена центрифугированием. Полное удаление растворенной воды производится распылением масла под глубоким вакуумом при пониженной температуре.

3. Связанная вода. Связанная вода является первичным признаком старения масла и образуется в результате окисления масла. При высоком нагреве, который бывает между обмотками и стальным сердечником трансформатора, растворенная вода переходит в парообразное состояние. Пары воды при соприкосновении с холодным маслом образуют растворенную воду.

4. Вода в виде эмульсии. Так называется смесь масла с субмикроскопическими капельками воды, которые не могут быть отделены от масла ни нагреванием, ни отстаем, ни фильтрованием [1–3].

Таким образом, осушка трансформаторного масла, независимо от используемого способа, не удаляет полностью воду, содержащуюся в масле в результате эксплуатации маслonaполненного оборудования.

Целью данной работы явилось изучение возможности использования хлорида кобальта для удаления влаги из трансформаторного масла.

Проведен качественный эксперимент, для которого отобран образец «чистого» трансформаторного масла марки ГК. Методом титрования по Карлу Фишеру [4–5] определено влагосодержание исходного образца. Далее исходный образец разделен на равные объемы в 4 емкости. В каждую из них, для создания исходных образцов с одинаковым влагосодержанием, помещено от 1 до 3-х бумажных полос размерами 2*5 см для контроля изменения влагосодержания. Каждая из полос помещена изначально в емкость с «чистой» водой на одну секунду. Далее данные образцы были герметично закрыты и помещены в темное помещение без проникновения прямых солнечных лучей для полного установления равновесия растворенной воды. По истечении 3-х суток у данных образцов измерено влагосодержание методом титрования по Карлу Фишеру.

Затем в каждый образец, в зависимости от влагосодержания, был добавлен шестиводный гидрат хлорида кобальта $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Образцы были герметично закрыты и помещены в темное помещение. По истечении 3-х суток у данных образцов было

измерено влагосодержание методом титрования по Карлу Фишеру. Данные измерений приведены в таблице.

Таблица

Влагосодержание образцов трансформаторного масла					
№ образца	Влагосодержание первоначальное, ppm	Количество добавленных полос бумаги	Влагосодержание после выдержки с бумагой, ppm	Количество добавленного $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, г	Влагосодержание после выдержки с хлоридом кобальта, ppm
1	25	1	27,6	0,157	0
2	25	2	29,2	0,251	0
3	25	3	31,1	0,380	0

Как показывает анализ приведенных результатов, использование кристаллогидратов хлорида кобальта для осушки трансформаторных масел приводит к их полному обезвоживанию. Это происходит за счет взаимодействия между молекулами хлорида кобальта и воды. Возможны два варианта: 1) хлорид кобальта взаимодействует только с молекулами воды; 2) хлорид кобальта растворяется в масле и взаимодействует как с маслом, так и с водой. Второй вариант не устраивает, т.к. при взаимодействии с маслом хлорид кобальта изменяет химический состав масла и, следовательно, изменяются его электрофизические показатели, что недопустимо [6–7].

Для определения взаимодействия хлорида кобальта с маслом и с водой проведен следующий опыт. Были записаны спектры поглощения в видимой и ближней ИК [8–10] области при комнатной температуре в кюветках толщиной 10 мм на спектрометре СФ-56 в диапазоне длин волн λ 300 ÷ 1000 нм (см. рисунок). На основании полученных результатов можно сделать вывод, что, независимо от количества добавленного хлорида кобальта, спектры трансформаторного масла не изменяются и, следовательно, не изменяется химический состав масла. Это говорит о том, что хлорид кобальта никак не реагирует с трансформаторным маслом и в полном объеме остается на дне емкости с трансформаторным маслом.

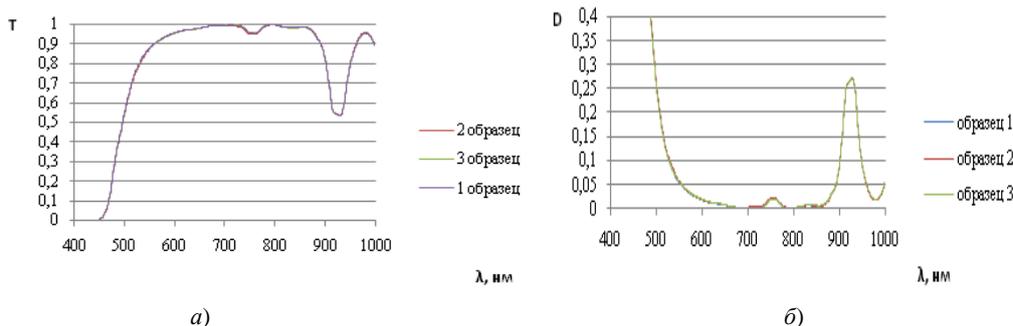


Рис. Спектры поглощения трансформаторного масла в ИК области: а) нормированный спектр; б) оптическая плотность

Однако результаты большого количества исследований точности и воспроизводимости влагосодержания титрованием по Карлу Фишеру показали, что данный метод практически нечувствителен к диспергированной воде, которая не может взаимодействовать с реагентом Карла Фишера. Кроме того, для правильного определения влагосодержания необходимо учитывать: кислоты и основания, образующиеся в ходе эксплуатации масла (кислотность рабочей среды должна быть в пределах 5–7 рН); медленно протекающие побочные реакции (потребление I_2 в химической реакции с

органическими компонентами масла с двойными связями, что приводит либо к повышенному кулонометрическому восстановлению йода, либо к повышенному добавлению реагента КФ) и многое другое.

Влияние загрязняющих компонентов на результаты осушки масла будут представлены в следующей нашей работе.

Таким образом, проведенные опыты показали, что применение кристаллогидратов приводит к полной осушке трансформаторных масел, при этом не происходит никаких взаимодействий реагента с самим маслом. Данный метод более экономичен и менее «ресурсозатратен».

Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, Iss.1. P.346–355.
3. Гарифуллин М.Ш. Диагностика состояния бумажной изоляции по ИК спектрам отражения и спектрам люминесценции // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №5-6. С. 57–65.
4. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Transformer state diagnosis in optical spectra of transformer oils // 2016. Т. 11, № 14. С. 3042–3046.
5. Гарифуллин М.Ш. Оценка диагностической ценности показателей качества изоляционного масла для систем мониторинга состояния трансформаторов. // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №5-6. С. 131–134.
6. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Методы оптической спектроскопии в диагностике состояния изоляции маслонаполненного электрооборудования / В.К. Козлов М.Ш. Гарифуллин. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 192 с.
7. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh., Turanov A.N. Luminescence of grade GK transformer oil // Chemistry and technology of fuels and oils. 2013. Vol. 48 № 6. P. 497–500.
8. Крищенко В.П. Ближняя инфракрасная спектроскопия. Москва, 1997. 639 с.
9. Козлов В.К., Загустина И.Д. Модифицированный метод определения влагосодержания трансформаторного масла // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 7-8. С. 87 – 90.
10. Garifullin, M.Sh., Kozlov V.K. Production technology and initial raw oil impact on transformer oil optical features during power transformer diagnosis // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8, Issue № 4. P. 27092–27101.

Авторы публикации

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: vk_kozlov@bk.ru.

Валиуллина Дилия Мансуровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: valiullinadiliya@mail.ru.

Ризванова Гульназ Ильдусовна – магистрант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: Gulnaz_50@mail.ru.

References

1. Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. Transformer oil. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 296 p.
2. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of aging degradation of the insulating elements in an oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, Iss.1. P.346–355.
3. Garifullin M.Sh. Diagnostics of the state of paper insulation by IR spectra of reflection and luminescence speckle // Izvestiya vuzov. Problems of energy. 2013. № 5-6. P. 57–65.
4. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Transformer state diagnosis in the optical spectra of transformer oils // 2016. P. 11, No. 14. P. 3042–3046.
5. Garifullin M.Sh. Evaluation of the diagnostic value of insulating oil quality indicators for transformer condition monitoring systems. // Proceedings of universities. Problems of energy. 2013. № 5-6. P. 131–134.
6. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Methods of optical spectroscopy in diagnosing the state of isolation of oil-filled electrical equipment / V.K. Kozlov, M.Sh. Garifullin. Kazan: Kazan. state. power. Univ., 2013. 192 p.
7. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh., Turanov A.N. Luminescence of grade GK transformer oil // Chemistry and technology of fuels and oils. 2013. Vol. 48, No. 6. P. 497–500.
8. Krishchenko V.P. Near Infrared Spectroscopy, Moscow, 1997. -639 p.
9. Kozlov V.K., Zagustina I.D. Modified method for determining the moisture content of transformer oil / VK Kozlov, ID Zagustina // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problems of energy. 2016. № 7-8. P. 87 – 90.
10. Garifullin, M.Sh., Kozlov V.K. Production technology and initial raw oil impact on transformer oil optical features during power transformer diagnosis // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8, Issue № 4. P. 27092–27101.

Authors of the publication

Vladimir K. Kozlov – Dr. Sci. (Phys.-math.), professor of the department "Electric power systems and networks" of Kazan State Energy University.

Diliya M. Valiullina – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of the department "Electric power systems and networks" of Kazan State Energy University.

Gul'naz I. Rizyanova – magister department "Electric power systems and networks" of Kazan State Energy University.

Поступила в редакцию

07 сентября 2017 г.

CONTENTS

ENERGETICS

SUKHOTSKY AG, SIDORIK G.S. Investigation of a mixed-convective heat treatment of single-air air cooled exchangers in various cross-steps pipe installation.	3
ZAKARIYUKIN VP, KRYUKOV AV, ALEKSEENKO EA Analysis of applicability of external network simplified models for definition of short circuit currents in systems of railroad traction power supply.	12
KULIKOV AL, VUKOLOV V.Yu., KOLESNIKOV AA, SHARYGIN M.V. Differential protection of busbar 110-220 kV with application of method of double entry	21
IVANITSKY M.S. Modeling the impact of temperature level in the zone of active combustion in the contents of nitrogen oxides and benz(a)pyrene in the combustion products of boiler plants heating systems. part 3. The intensity of the formation pahs in the typical temperature zones of the torch.	32
SOLODOVA NL, CHERKASOVA EI, SALAKHOV II, TUTUBALINA VP Hydrogen – the energy carrier and the reagent. the technology of its receipt.	39
DANKO VP, DOROSHENKO A.V. Alternative life support system on the basis of the indirect cycle with regeneration of absorbent.	51
AMIN RZ, NOVICHKOV SV Use of the absorption lithium bromide refrigerating machine for increase in overall performance of compressed-air power station.	62
MUSSONOV GP, SELEZNEV AS, FEDCHISHIN VV Increase the accuracy of determining the values of harmonic components in electrical signals.	73
STENNIKOV VA, BARAKHTENKO EA, SOKOLOV DV, SHELEKHOVA V.B. Active demand-side management	88
VALIYEV RN, ZIGANSHIN SHG, VANKOV Yu.V., GARIPOV RR Improving the efficiency of the combined cycle plant with heat-recovery boiler due to the inclusion in the scheme of absorption converter of heat.	101
Laptev AG, BASHAROV MM, FARAKHOV TM Determination of heat transfer coefficients in channels with intensifiers process.	112

ENERGY, METALLURGICAL AND CHEMICAL ENGINEERING

MARAKIN AN, SOTNIKOV DG, AFANASYEVA OV Development of energy-chemical installation with combined production of energy carriers and technological gas.	119
--	-----

ELECTRICAL ENGINEERING

KRASNOSHNIKOV AS, KUZNETSOV G.V. Numerical analysis of the temperature fields of the lithium-ion battery under conditions of high current loads.	126
---	-----

INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

SHILIN AA, DEMENTIEV SS Sag video measurement device for evaluation of ohl icing intensity.	135
--	-----

PHYSICS

KISELYOV V.G. The isothermal expansion of perfect gas and the chemical affinity.	142
---	-----

FOR DEFENCE OF THESES

KOZLOV VK, RIZVANOVA GI, VALIULLINA DM Possibility of application of crystalhydrades of cobalt chloride for drying transformer oils	152
--	------------

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ
«ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ» В 2017 ГОДУ

ЭНЕРГЕТИКА

АНТОНОВ А.И. Исследование уровня электромагнитных помех в сети 10/0,4 кВ с силовыми трансформаторами различной мощности при несимметричном характере нагрузки. № 9-10. С. 65–66.

АМИНОВ Р.З., НОВИЧКОВ С.В. Использование абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины для повышения эффективности работы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции. № 11-12. С. 62–72.

АФАНАСЬЕВА О.В., ГАЛЬКЕЕВА А.А., ВАФИН А.Р., МИНГАЛЖЕЕВА Г.Р. Региональные аспекты использования угля на объектах малой распределенной энергетики. № 9-10. С. 85–93.

БА БОРАИК А.М., УСАЧЕВ А.Е., КУБАРЕВ А.Ю., МАРГУЛИС С.М. Особенности наблюдения частичных разрядов в статорах турбогенераторов, включенных в сеть. № 3-4. С. 80–83.

БАЛОБАНОВ Р.Н., ЗАРИПОВ Д.К., НАСИБУЛЛИН Р.А. МАРГУЛИС С.М. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции. № 3-4. С. 119–125.

БУРЯНИНА Н.С., ВАСИЛЬЕВА К.П., КОРОЛЮК Ю.Ф., ЛЕСНЫХ Е.В., СУСЛОВ К.В. Определение места короткого замыкания на линиях электропередачи 110 кВ и выше по мгновенным значениям токов и напряжений. № 3-4. С. 107–118.

ВАЛИЕВ Р.Н., ЗИГАНШИН Ш.Г., ВАНЬКОВ Ю.В., ГАРИПОВ Р.Р. Повышение эффективности парогазовой установки с котлом-утилизатором за счет включения в схему абсорбционного преобразователя теплоты. № 11-12. С. 101–111.

ВЫСОКОМОРНАЯ О.В., ПИСКУНОВ М.В., ОПАРИН А.О., ВЕРГУН А.П. Интенсивное охлаждение модели стенки реактора при использовании водных растворов солей. № 5-6. С. 41–50.

ГАЙНУЛЛИНА Л.Р., ТУГУБАЛИНА В.П. Влияние сераорганических соединений на гигроскопичность трансформаторного масла и его электрические характеристики. № 7-8. С. 65–70.

ГАРИФУЛЛИН М.Ш., ГИНИАТУЛЛИН Р.А., КОЗЛОВ В.К., РЕЗАТДИНОВ Р.Л., РИЗВАНОВА Г.И. Определение технологии производства и марки минеральных трансформаторных масел по их оптическим спектрам. № 9-10. С. 59–64.

ГАФУРОВ А.М., ОСИПОВ Б.М., ГАТИНА Р.З., ГАФУРОВ Н.М. Возможные пути снижения выбросов углекислого газа. № 9-10. С. 21–31.

ГАФУРОВ А.М., ОСИПОВ Б.М., ГАФУРОВ Н.М., ГАТИНА Р.З. Перспективы использования бинарных циклов в утилизации низкопотенциальной теплоты на геотермальных электростанциях. № 5-6. С. 14–24.

ГЕОРГИЕВСКАЯ Е.В. Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации гидроагрегатов за пределами проектного срока службы. № 7-8. С. 33–42.

ГРАЧЕВА Е.И., НАУМОВ О.В., ФЕДОТОВ Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики. № 7-8. С. 71–77.

ГРАЧЕВА Е.И., САДЫКОВ Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения. № 1-2. С. 95–101.

ГРИГОРЬЕВА Д.В., КАЛЮТИК А.А. Оценка эффективности методов снижения технологического минимума энергоблока ТЭЦ. № 7-8. С. 3–12.

ГУМЕРОВА Р.Х., ЧЕРНЯХОВСКИЙ В.А. Моделирование потребления электроэнергии приводами насосов при дроссельном и частном регулировании производительности. № 3-4. С. 96–106.

ДАНЬКО В.П., ДОРОШЕНКО А.В. Альтернативные системы жизнеобеспечения на

основе цикла с непрямой регенерацией абсорбента. № 11-12. С. 51–61.

ДМИТРИЕНКО М.А., НЯШИНА Г.С., ШЛЕГЕЛЬ Н.Е., ШЕВЫРЕВ С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий. № 3-4. С. 41–52.

ДОЛЖИКОВ А.С., МОГОРЫЧНЫЙ В.И. Экспериментальный стенд для исследования процесса кипения смесей, используемых в низкотемпературной технике. № 9-10. С. 11–20.

ЕДЕЛЕВА О.А. Выбор методического подхода для решения задачи оптимального развития энергоисточников в теплоснабжающих системах городских территорий. № 5-6. С. 58–68.

ЕРЕМИН А.В., КОЛЕСНИКОВ С.В., КУДИНОВ И.В., БРАНФИЛЕВ А.Н., АБИШЕВ Л.С. Математическая и компьютерная модель объединенной теплосети централизованного теплоснабжения. № 1-2. С. 3–14.

ЖУКОВ В.В., ЕВСЮКОВ И.А., АЛЕКСАНДРОВ А.С. Определение условий успешного запуска энергоблока ПГУ от аварийной дизельной электростанции. № 7-8. С. 43–55.

ЖУКОВ Д.В., ЧИЧЕРИН С.В. Некоторые результаты проведения гидравлических испытаний на магистральных тепловых сетях города Омска. № 1-2. С. 15–22.

ЗАКАРЮКИН В.П., КРЮКОВ А.В., АЛЕКСЕЕНКО Е.А. Моделирование аварийных режимов в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог. № 1-2. С. 64–74.

ЗАКАРЮКИН В.П., КРЮКОВ А.В., АЛЕКСЕЕНКО Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог. № 11-12. С. 12–20.

ЗАРИПОВА А.Д., ЗАРИПОВ Д.К., УСАЧЕВ А.Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции. № 5-6. С. 51–57.

ЗВОНАРЕВА Ю.Н., ВАНЬКОВ Ю.В. Работа системы теплоснабжения при поэтапном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов. № 1-2. С. 31–40.

ИВАНИЦКИЙ М.С. Моделирование влияния температурного уровня в зоне активного горения на содержание оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания котельных установок систем теплоснабжения. Часть 1. Сжигание крекинг-мазута в паровом котле БКЗ-420-140 НГМ. № 7-8. С. 56–64.

ИВАНИЦКИЙ М.С. Моделирование влияния температурного уровня в зоне активного горения на содержание оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания котельных установок систем теплоснабжения. Часть 2. Горение мазута в водогрейном котле КВ-ГМ-100(116,3/150). № 9-10. С. 3–10.

ИВАНИЦКИЙ М.С. Моделирование влияния температурного уровня в зоне активного горения на содержание оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания котельных установок систем теплоснабжения. Часть 3. Интенсивность образования ПАУ в характерных температурных зонах факела. № 11-12. С. 32–38.

КОЗЛОВ В.К., КИРЖАЦКИХ Е.Р. Автономный емкостной источник питания для устройств измерения параметров воздушной линии электропередачи. № 3-4. С. 61–68.

КОРОБЕЙНИКОВ С.М., ЛЮТИКОВА М.Н. Методы контроля влагосодержания жидких диэлектриков. состояние и проблемы. № 9-10. С. 32–49.

КУЛИКОВ А.Л., ВУКОЛОВ В.Ю., КОЛЕСНИКОВ А.А., ШАРЫГИН М.В. Дифференциальная защита шин 110-220 кВ с применением метода двойной записи. № 11-12. С. 21–31.

ЛАРИОНОВ В.М., САЙФУЛЛИН Э.Р., НАЗАРЫЧЕВ С.А., МАЛАХОВ А.О., ВАНЬКОВ Ю.В. Алгоритм оптимизации процесса сжигания попутного нефтяного газа в тепловых энергетических установках с учетом непостоянства его состава. № 3-4. С. 3–9.

ЛАПТЕВ А.Г., БАШАРОВ М.М., ФАРАХОВ Т.М. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах с интенсификаторами процесса. № 11-12. С. 112–118.

ЛИЗУНОВ И.Н., ВАСЕВ А.Н., МИСБАХОВ Р.Ш., ФЕДОТОВ В.В., ХАФИЗОВА Э.А. Технологии передачи данных в современных системах релейной защиты и автоматики и их показатели качества. № 1-2. С. 52–63.

МАЗАНОВ С.В., УСМАНОВ Р.А., АМИРХАНОВ Р.Д., ГУМЕРОВ Ф.М. Экспериментальное исследование процесса получения биодизельного топлива в сверхкритических флюидных условиях. № 1-2. С. 41–51.

МУССОНОВ Г.П., СЕЛЕЗНЕВ А.С., ФЕДЧИШИН В.В. Повышение точности определения значений гармонических составляющих в электрических сигналах. № 11-12. С. 73–87.

МЫШКИНА А.С. Малая генерация – средство повышения живучести энергосистемы. № 1-2. С. 23–30.

НГУЕН Х.Д., ВАЛЕЕВ И.М. Разработка методики расчета потерь мощности и уровня напряжения в сложных распределительных. № 1-2. С. 75–85.

НЕПША Ф.С., ГЛУШКОВА А.И., ВОРОБЬЕВА Д.Ю. К вопросу обеспечения правильной работы устройств автоматической частотной разгрузки в Кузбасской энергосистеме. № 9-10. С. 77-84.

ОМОРОВ Т.Т., КУРБАНАЛИЕВА Р.Н., ОСМОНОВА Р.Ч. Оценка потерь электроэнергии в условиях неопределенности в составе АСКУЭ. № 3-4. С. 126–135.

ПОЛОВНИКОВ В.Ю. Численный анализ влияния вида конструкций канальной тепловой сети на ее тепловые режимы и тепловые потери. № 5-6. С. 79–88.

ПОСТНИКОВ И.В., СТЕННИКОВ В.А. Обеспечение параметрической надежности теплоснабжающих систем. № 3-4. С. 20–30.

ПЯТЫГИНА М.В., МИНГАЛЕЕВА Г.Р. Комплексное использование торфа на основании молекулярного состава его органической массы. № 5-6. С. 3–13.

САВИНА Н.В., АРТЮШЕВСКАЯ Е.Ю. Актуальные проблемы реализации Федерального закона №261 от 23.11.2009 г. в Российской Федерации в части теплоснабжения. № 3-4. С. 31–40.

САДЫКОВ А.В., БУТЯКОВ М.А. К решению уравнения переноса излучения методом дискретных ординат. № 5-6. С. 25–34.

САДЫКОВ А.В. К решению уравнения переноса излучения методом дискретных ординат в осесимметричной цилиндрической области. № 7-8. С. 78–84.

САЛТАНАЕВА Е.А., ТАЙМАРОВ М.А., АХМЕТОВА Р.В., СУНГАТУЛЛИН Р.Г., АЛЬ ЗУБАЙДИ АЛИ НАЛИБ САЛИХ Тепловые потоки от факела в котлах с различной компоновкой горелок. № 9-10. С. 50–58.

СМОЛЕНЦЕВ Н.И., КОНДРИН С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей. № 3-4. С. 53–60.

СОЛОДОВА Н.Л., ЧЕРКАСОВА Е.И., САЛАХОВ И.И., ТУТУБАЛИНА В.П. Водород - энергоноситель и реагент. Технологии его получения. № 11-12. С. 39–50.

СТЕННИКОВ В.А., БАРАХТЕНКО Е.А., СОКОЛОВ Д.В., ШЕЛЕХОВА В.Б. Активное участие потребителя в управлении своим энергоснабжением. № 11-12. С. 88–100.

СУСЛОВ К.В., СОЛОНИНА Н.Н., ГЕРАСИМОВ Д.О. Современные подходы к оценке качества электрической энергии. № 7-8. С. 85–93.

СУХОЦКИЙ А.Г., СИДОРИК Г.С. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб. № 11-12. С. 3–11.

ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., САФИНА А.В., АРСЛАНОВА Г.Р., ЗИАТДИНОВА Д.Ф. Повышение энергоэффективности процесса экстракции. № 5-6. С. 35–40.

ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., САФИНА А.В., ХАБИБУЛЛИНА А.Р., МАЗАРОВ И.Ю. Современное состояние производства древесного угля. № 7-8. С. 13–20.

ФЕДОТОВ А.И., ВАГАПОВ Г.В., ЧЕРНОВА Н.В. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи 6–35 кВ на «резонансных» частотах при ОЗЗ. № 5-6.

С. 69–78.

ХАГЛЕЕВ Е.П. Золошлакоотвалы годичного регулирования дифференцированных потоков золы и шлака угольных ТЭС. № 7-8. С. 21–32.

ХАЙРУТДИНОВ В.Ф., ГУМЕРОВ Ф.М. Нефтяные отходы и битуминозный песчаник как важный источник нефтепродуктов и проблемный экологический фактор. № 3-4. С. 10–19.

ХВОРЕНКОВ Д.А., ВАРФОЛОМЕЕВА О.И., КОРЕПАНОВ Е.В. Расчет температурно-влажностного режима стенок кирпичных и железобетонных дымовых труб. № 9-10. С. 94–105.

ХРУСТАЛЕВ В.А., БАШЛЫКОВ Д.О., ГАРИЕВСКИЙ М.В. Вопросы эффективности высоковольтных частотно-регулируемых приводов ГЦН энергоблока АЭС с ВВЭР. № 7-8. С. 94–105.

ШАГИДУЛЛИН А.В. Эффективность замены низковольтных коммутационных аппаратов на примере промышленного предприятия. № 3-4. С. 89–95.

ШАРАПОВ В.И., КУДРЯВЦЕВА Е.В., ПАЗУШКИНА О.В. Массообмен и гидродинамика деаэраторов ТЭС при использовании в качестве десорбирующей среды природного газа. № 1-2 С. 86–94.

ЯРОСЛАВСКИЙ Д.А., САДЫКОВ М.Ф. Разработка устройства для системы мониторинга и количественного контроля гололедообразования на воздушных линиях электропередачи. № 3-4. С. 69–79.

ЯРОСЛАВСКИЙ Д.А., САДЫКОВ М.Ф., КОНОВ А.Б., ИВАНОВ Д.А., ГОРЯЧЕВ М.П., ЯМБАЕВА Т.Г. Методика мониторинга гололедных отложений на проводах ВЛ с учетом разрегулировки линейной арматуры. № 5-6. С. 89–97.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТУЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГАФУРОВ А.М., ОСИПОВ Б.М., ГАТИНА Р.З., ГАФУРОВ Н.М. Повышение энергоэффективности конвертированных авиационных газотурбинных двигателей типа НК-16СТ с использованием обращенного газогенератора. № 7-8. С. 105–113.

ДМИТРИЕВА О.С., ЛОРАЙ С.Ф., ЗИНУРОВ В.Э., ЗВЕРЕВА Э.Р., ШАГЕЕВ М.Ф. Определение оптимальных зон ввода твердых присадок в воздуховод котла. № 9-10. С. 106–110.

ИВАНОВ В.А. Рациональный способ оптимизации цикла газотурбинных установок. № 3-4. С. 136–143.

МРАКИН А.Н., СОТНИКОВ Д.Г., АФАНАСЬЕВА О.В. Разработка энергохимической установки с комбинированной выработкой энергоносителей и технологического газа. № 11-12. С. 119–125.

ПЛОТНИКОВ Л.В., ЖИЛКИН Б.П., БРОДОВ Ю.М. Влияние поперечного профилирования впускных и выпускных трубопроводов поршневых двигателей на тепломеханические характеристики потоков. № 1-2. С. 119–128.

САДЫКОВ Р.Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения. № 5-6. С. 98–108.

ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., ТУНЦЕВ Д.В., ХАЙРУЛЛИНА М.Р., КИТАЕВ С.В. Технология и оборудование для электроэнергетического использования древесных отходов. № 1-2. С. 102–107.

ХАСАНОВ Н.Г., ШИГАПОВ А.Б. Оптимальная степень сжатия воздуха в газотурбинной установке с промежуточным воздухоохладителем. № 1-2. С. 108–118.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

КАПАЕВ В.И. Катафот дорожного барьерного ограждения с автономной системой электроподсветки. № 3-4. С. 150–157.

КРАСНОШЛЫКОВ А.С., КУЗНЕЦОВ Г.В. Численный анализ температурных полей литий-ионного аккумулятора в условиях высоких токовых нагрузок. № 11-12. С. 126–134.

НАУМОВ А.А., САДЫКОВ М.Ф. Некоторые аспекты энергосбережения в осветительной технике. № 5-6. С. 109–118.

ШЕРЬЯЗОВ С.К., ПЯТКОВ А.В. Токи небаланса при межвитковом замыкании в обмотках трансформаторов 6-10/0,4 кВ. № 3-4. С. 144–149.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

БА БОРАИК А.М., УСАЧЕВ А.Е., КУБАРЕВ А.Ю. Влияние параметров схемы регистрации на форму и амплитуду частичных разрядов. № 1-2. С. 127–136.

ВАСИЛЬЕВ Д.В., ЛАРЮШИН А.И. Моделирование зоны локации непрерывного моностатического доплеровского лидара определения параметров ветра. № 3-4. С. 175–182.

ГАТИЯТОВ И.З., САБИТОВ Л.С. Разработка методики и специального стенда ИС-1 для испытания опор контактных сетей электрического транспорта. № 1-2. С. 152–163.

ГИБАДУЛЛИН Р.Р., ЦВЕТКОВ А.Н., ИВШИН И.В., ДОЛОМАНЮК Л.В. Бездатчиковый метод контроля положения подвижного элемента электрической машины возвратно-поступательного действия. № 7-8. С. 133–143.

КАЗАРИНОВ Л.С., ВСТАВСКАЯ Е.В., ДЖ.А.САИД. Исследование процессов в многоканальных стабилизаторах тока светозлучающих диодов на основе моделирования. № 3-4. С. 167–174.

КАШАЕВ Р.С., КУБАНГО Б.Э. КОЗЕЛКОВ О.В. Проточные протонные магнито-резонансные анализаторы для контроля скважинной жидкости по ГОСТ Р 8.615-2005 ГСИ. № 1-2. С. 137–151.

КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В., ИДИЯТУЛЛИН З.Ш., ТЕМНИКОВ А.Н., ОЖЕРЕЛЬЕВА Е.Н., ПЕРЕЛЕВСКИЙ Е.В. Приборы и методы контроля концентрации парафина в нефти. № 3-4. С. 158–166.

КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В., МАЛЕЕВ Н.А., КУБАНГО Б.Э.М. Автоматическое управление электроцентробежным насосом, используя контроль параметров скважинной жидкости проточным магнито-резонансным анализатором. № 5-6. С. 119–131.

НИКУЛИН О.В., ШАБАНОВ В.А. Компьютерная модель регулятора подачи долота на основе электродвигателя постоянного тока и ферропорошкового тормоза. № 3-4. С. 184–194.

НОВИКОВ С.И., КУЗЬМИН И.А., ХУЗЯШЕВ Р.Г. Простейшие алгоритмы обнаружения сигналов переходного процесса напряжения в линиях электропередач. № 7-8. С. 114–125.

СЕНИЦИН А.М., УЛАНОВ В.А. Автоматизированный прибор контроля основных термоэлектрических характеристик халькогенидов свинца. № 7-8. С. 126–132.

ШИЛИН А.А., ДЕМЕНТЬЕВ С.С. Устройство видеоизмерения линейного габарита для оценки интенсивности оледенения ЛЭП. № 11-12. С. 135–143.

ФИЗИКА

БИЛАЛОВ Т.Р., ГУМЕРОВ Ф.М. Экстракция энергонасыщенных компонентов из сгорающих материалов в среде чистого и модифицированного сверхкритического CO₂. № 5-6. С. 132–143.

ГУБАЙДУЛЛИН Д.А., ОСИПОВ П.П., АЛЬМАКАЕВ И.М. Моделирование дрейфа мелкодисперсных частиц в акустическом резонаторе с помощью пакета CFD. № 9-10. С. 111–120.

КИСЕЛЕВ В.Г. Изотермическое расширение идеального газа и химическое сродство. № 11-12. С. 142–151.

МЕЛАМЕД Л.Э., ФИЛИППОВ Г.А. Моделирование турбулентности как "вихревой засыпки". № 9-10. С. 121–131.

К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

АЙХАЙТИ ИСЫХАКЭФУ Разработка измерительного комплекса для исследования качества светодиодных осветительных приборов. № 7-8. С. 144–148.

КОЗЛОВ В.К., РИЗВАНОВА Г.И., ВАЛИУЛЛИНА Д.М. Возможность применения кристаллогидратов хлорида кобальта для осушки трансформаторных масел. № 11-12. С. 152–156.

ЛАПТЕВА Е.А., СТОЛЯРОВА Е.Ю., ЛАПТЕВ А.Г. Трение в восходящем газожидкостном потоке в канале с хаотичной насадкой. № 1-2. С. 170–178.

СЕМЕНОВА Е.В., ИОВЛЕВА О.В., ЛАРИОНОВА И.В., ВАНЬКОВ Ю.В. Частоты колебаний газа при горении твердого топлива в коаксиальных трубах. № 1-2. С. 164–169.

СЕРДЕЧНЫЙ Д.В. ТОМАШЕВСКИЙ Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи. № 9-10. С. 139–144.

ФИЛИНА О.А. Исследование эксплуатационного ресурса электрощеток электродвигателя постоянного тока подвижного состава. № 9-10. С. 132–138.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

АЙХАЙТИ ИСЫХАКЭФУ, ТУКШАИТОВ Р.Х. Контроль температуры корпуса светодиодных ламп при работе в разных осветительных устройствах. № 9-10. С. 145–149.

ЛИПАНТЬЕВ Р.Е., ТУТУБАЛИНА В.П. Влияние сжигания сернистых мазутов на окружающую среду. № 5-6. С. 144–148.

МУТУГУЛЛИНА И.А. Преимущества энергосервисного договора. № 1-2. С. 174–178.

РЕЦЕНЗИИ И ИНФОРМАЦИЯ

ГУРЕВИЧ В.И. Основные средства защиты подстанций от ЭМИ ЯВ: быстрое руководство. № 5-6. С. 149–165.

ЛАПТЕВ А.Г. Новинки научно-технической литературы. № 1-2. С. 179.

ЮБИЛЕИ

К 70-ЛЕТИЮ В.И. ШАРАПОВА.. № 5-6. С. 164–165.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ»**

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Журнал «Известия вузов. Проблемы энергетики» имеет тематическую направленность и публикует статьи по фундаментальным и прикладным проблемам энергетики.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

3. Автор может опубликовать в одном номере журнала не более одной статьи.

4. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

5. Авторам гонорар не выплачивается.

6. К рукописи статьи прилагаются:

- сопроводительное письмо от организации, в которой выполнена работа;
- экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

7. **Структура статьи должна быть следующей:** УДК (сверху слева); название статьи; инициалы и фамилия авторов; названия учреждений, в которых выполнена работа, их местонахождение (город); аннотация и ключевые слова на русском языке (аннотация и ключевые слова на английском языке размещаются следующим абзацем). Введение; разделы (параграфы); заключение; список литературы (не более 20 источников). Для экспериментальных работ рекомендуется иметь в статье выделенные части: введение, методику исследования, основные результаты, обсуждение результатов, выводы. **Каждая статья должна заканчиваться выводами, фиксирующими основные результаты работы, их значение для теории и практики.**

Сведения о каждом авторе: фамилия, имя, отчество (полностью); полное название организации – места работы (учебы), ее почтовый адрес; занимаемая должность, ученая степень; E-mail; указать с кем из авторов (если авторов несколько) вести переписку или переговоры.

8. **В редакцию предоставляется на английском языке:** название статьи; аннотация и ключевые слова; список литературы; полные сведения об авторах.

9. Объем рукописи научной статьи не должен превышать 10 страниц, включая рисунки; статьи в рубрику «К защите диссертаций» – 4-х страниц, включая рисунки; кратких сообщений – 2 страниц.

10. Рукопись должна быть тщательно выверена и подписана всеми авторами.

11. Рукопись статьи представляется в двух экземплярах и по E-mail в формате Microsoft Word 2003. Для уменьшения вероятности сбоя при чтении данных желательно сделать несколько копий файлов.

Электронный вариант рукописи статьи с полным комплектом документов может быть направлен по E-mail.

12. При наборе на компьютере следует соблюдать следующие правила оформления рукописи:

- **Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman, размером 10 пт с межстрочным интервалом «минимум 12пт» и печатается на одной стороне стандартного (A4) листа белой бумаги. Следует установить следующие размеры полей: сверху - 2 см, снизу – 1,5 см, слева – 4,5 см и справа – 2,5 см. На вкладке «Размер бумаги» выбрать параметр «Другой» и установить ширину листа 21 см, высоту 25,5 см. Отступ первой строки должен быть строго 1 см.**

- Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Различать дефис «-», знак «минус» «-», и тире «-». Переносы в словах не употреблять. Не использовать для форматирования текста знаки пробела.

- Все сокращения, за исключением общепринятых, расшифровываются при их первом упоминании в тексте статьи.

- Значения физических величин приводятся в единицах СИ или разрешенных к употреблению наравне с ними.

- **Формулы** набирают обычным шрифтом с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0, соблюдая размеры: обычный текст – 10 пт, крупный индекс – 9 пт, мелкий индекс – 8 пт, крупный символ – 16 пт, мелкий символ – 12 пт.

- Буквы латинского алфавита (как и в основном тексте) набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \lg , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом.

- Длина формул не должна превышать 10 см. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные независимые фрагменты.

- Нумерацию и знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруют у правого края страницы арабскими цифрами в круглых скобках.

- **Рисунки, число которых должно быть логически оправданным, должны иметь расширение совместное с MS Word (рисунок MS Word, редакторы CorelDraw, Photoshop).**

На диске рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов, желательно в формате TIF с разрешением 300 dpi.

- Правила выполнения рисунков: формат – не более 10×8 см; толщина линий: основных – 2 пт, вспомогательных – 1 пт. Для обозначений в поле рисунка, также как и для подрисуночной надписи, использовать шрифт Times New Roman, размером не менее 9пт. Рисунки с большим количеством деталей (сложные схемы, графики) размещать на всю ширину стр. (14 см).

- Фотографии должны быть четкими, на глянцевой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG, GIF. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi - для полутонных.

- Таблицы должны иметь нумерацию, тематические заголовки и выполняться на отдельных листах. Ширина таблицы не должна превышать 14 см.

- Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках. Сокращения допускаются только общепринятые. Обозначения на рисунках должны строго соответствовать обозначениям в тексте.

- Ссылки на литературные источники нумеруются в порядке упоминания в тексте арабскими цифрами и указываются в квадратных скобках.

- Список литературы печатается на отдельном листе и оформляется по ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на неопубликованные сообщения (кроме защищенных диссертаций) не допускаются. Иностранные фамилии даются в тексте в русской, а в списке литературы – в оригинальной транскрипции.

13. Возвращение рукописи на доработку не означает, что статья уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в двух экземплярах вместе с ее начальной версией, рецензией и письмом с ответами на замечания рецензента.

14. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редколлегией вновь. Датой представления считается дата поступления в редакцию исправленной статьи.

15. Решение редакционной коллегии о принятии статьи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

16. Авторам высылается один отдельный оттиск их статьи.

17. При несоблюдении авторами указанных Правил рукописи к рассмотрению не принимаются.

Адрес редакции: Журнал «Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ»,
Казанский Государственный Энергетический Университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, д.51,
Тел./факс: (843) 527-92-76, E-mail: problems_ener@mail.ru.