

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Том 19 № 9-10

Сентябрь - октябрь 2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1999 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:	Абдуллазянов Эдвард Юнусович , канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:	Шамсутдинов Эмиль Васильевич , канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР:	Потапова Татьяна Петровна , канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
РЕДАКТОР:	Калинина Марина Владимировна , Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
<i>Свидетельство о регистрации</i> ISSN	ПИ № 77-7322 от 19.02.2001г. 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

№ 9-10

сентябрь-октябрь 2017

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ**

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1999 ГОДА

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ЭНЕРГЕТИКА

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)	3
ДОЛЖИКОВ А.С., МОГОРЫЧНЫЙ В.И. Экспериментальный стенд для исследования процесса кипения смесей, используемых в низкотемпературной технике. ...	11
ГАФУРОВ А.М., ОСИПОВ Б.М., ГАТИНА Р.З., ГАФУРОВ Н.М. Возможные пути снижения выбросов углекислого газа.	21
КОРОБЕЙНИКОВ С.М., ЛЮТИКОВА М.Н. Методы контроля влагосодержания жидких диэлектриков. Состояние и проблемы	32
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.	50
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	59
АНТОНОВ А.И. Исследование уровня электромагнитных помех в сети 10/0,4 кВ с силовыми трансформаторами различной мощности при несимметричном характере нагрузки.	65
НЕПША Ф.С., ГЛУШКОВА А.И., ВОРОБЬЕВА Д.Ю. К вопросу обеспечения правильной работы устройств автоматической частотной разгрузки в Кузбасской энергосистеме.	77
АФАНАСЬЕВА О.В., ГАЛКЕЕВА А.А., ВАФИН А.Р., МИНГАЛЕЕВА Г.Р. Региональные аспекты использования угля на объектах малой распределенной энергетики.	85
ХВОРЕНКОВ Д.А., ВАРФОЛОМЕЕВА О.И., КОРЕПАНОВ Е.В. Расчет температурно-влажностного режима стенок кирпичных и железобетонных дымовых труб.	94

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ
И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ДМИТРИЕВА О.С., ЛОРАЙ С.Ф., ЗИНУРОВ В.Э., ЗВЕРЕВА Э.Р., ШАГЕЕВ М.Ф. Определение оптимальных зон ввода твердых присадок в воздухоподогреватель котла.	106
---	-----

ФИЗИКА

ГУБАЙДУЛЛИН Д.А., ОСИПОВ П.П., АЛЬМАКАЕВ И.М. Моделирование дрейфа мелкодисперсных частиц в акустическом резонаторе с помощью пакета CFD.	112
МЕЛАМЕД Л.Э., ФИЛИПОВ Г.А. Моделирование турбулентности как "вихревой засыпки".	122

К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

ФИЛИНА О.А. Исследование эксплуатационного ресурса электрощеток электродвигателя постоянного тока подвижного состава.	133
СЕРДЕЧНЫЙ Д.В. ТОМАШЕВСКИЙ Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи. ...	140

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

АЙХАЙТИ ИСЫХАКЭФУ, ТУКШАИТОВ Р.Х. Контроль температуры корпуса светодиодных ламп при работе в разных осветительных устройствах.	146
CONTENS.	151
Правила оформления статей.	152



УДК 526.35

**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)**

М.С. Иваницкий

**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»,
в г. Волжском, Россия
mseiv@yandex.ru**

Резюме: В статье представлены расчетные экологические показатели котла КВ-ГМ-100 (116,3/150), сжигающего высокосернистый мазут, полученные на основе моделирования характеристик топочного процесса. Выполнен анализ влияния времени пребывания продуктов сгорания в топке, среднеинтегральной температуры в зоне активного горения, адиабатической температуры горения топлива на интенсивность образования оксидов азота и бенз(а)пирена в уходящих газах. Получены новые математические зависимости для расчета концентраций токсичных компонентов дымовых газов на основе температурных и временных параметров топочного процесса и продуктов сгорания мазута.

Ключевые слова: высокосернистый мазут, горение, 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 2. BURNING OIL HOT WATER BOILER KV-GM-100(116,3/150)**

M.S. Ivanitskiy

**Volzhsky Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute», Volzhsky, Russia
mseiv@yandex.ru**

Abstract: The article presents the estimated environmental performance of the boiler KV-GM-100 (116,3/150) burning high-sulphur oil received on the basis of modeling of characteristics of the combustion process. The analysis of the influence of the residence time of combustion products in the furnace, the average integral temperature in the zone of active combustion, the adiabatic combustion temperature of the fuel on the intensity of the formation of nitrogen oxides and benzpyrene in flue gases. The resulting new mathematical dependences for calculation of the concentrations of toxic components of flue gases based on temperature and time parameters of the combustion process and combustion products of fuel oil.

Keywords: high-sulphur fuel oil, combustion, benzpyrene.

Введение

Сжигание мазута в котлах систем теплоснабжения городов способствует образованию в продуктах сгорания оксидов азота, серы, углерода и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Повышение эффективности сжигания мазута в топочных камерах котлов, в том числе, основано на определении механизмов и степени воздействия режимных мероприятий на температурный уровень в зоне активного горения (ЗАГ). В зависимости от рабочего состава топочных мазутов и температурных характеристик работы камеры сжигания котла концентрацию оксидов азота (NO_2) и бенз(а)пирена (БП) в продуктах сгорания определяют на основе нормативных расчетных методик и моделирования процессов сжигания топлива, экспериментальной индикацией с помощью портативных газоанализаторов, газовых и жидкостных хроматографов [1÷3].

Результаты оптимизации режимов работы и исследования схем сжигания мазута на котлах различной мощности с использованием механических и других типов форсунок с учетом обеспечения экологических показателей представлены в работах [4÷7]. При этом практически отсутствуют данные об уровне и характере совместного изменения выбросов оксидов азота, серы и БП при сжигании высокосернистого мазута в энергетических котлах.

Определение эффективности сжигания высокосернистого мазута в системах теплоснабжения г. Волжского и исследование уровня выбросов NO_2 , сернистого ангидрида (SO_2) и БП в атмосферу городских и прилегающих территорий выполнено на основе моделирования режимов работы водогрейного газомазутного котла КВ-ГМ-100(116,3/150) Волжской ТЭЦ Волжского производственного подразделения ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго».

Численное моделирование

Температура на выходе из зоны активного горения $T_{\text{заг}}$, К находилась методом последовательных приближений (предварительно принимая $T_{\text{ад}}$ в пределах 1300–2100 К) по выражению [8]

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

где $T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура горения мазута, К; Bo – критерий радиационного теплообмена Больцмана; M – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов (для газомазутных котлов, принимается 0,4).

Критерий радиационного теплообмена Больцмана рассчитывался по известной формуле [8]

$$\text{Bo} = \frac{10^{11} \phi B_p (Vc)_r}{5,67 \psi F \varepsilon_T T_{\text{ад}}^3}, \quad (2)$$

здесь $5,67 \cdot 10^{-11}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м²·К⁴); ϕ – коэффициент сохранения тепла; B_p расчетный расход мазута, кг/с; $(Vc)_r$ – суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива, МДж/(кг °С); ψF – произведение коэффициента эффективности экранов на суммарную поверхность, ограничивающую ЗАГ, м²; ε_T – коэффициент теплового излучения топки в ЗАГ.

Критерий радиационного теплообмена Больцмана также определялся на основе безразмерной температуры продуктов сгорания на выходе из топочной камеры и параметра – M , учитывающего влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов, по уточненному выражению

$$Bo = \left(\frac{M}{\Theta^{-1} - 1} \right)^{5/3}, \quad (3)$$

где Θ – безразмерная температура продуктов сгорания на выходе из топочной камеры котла.

На рис. 1 показана зависимость изменения безразмерной температуры на выходе из топки Θ – от критерия радиационного теплообмена Больцмана Bo .

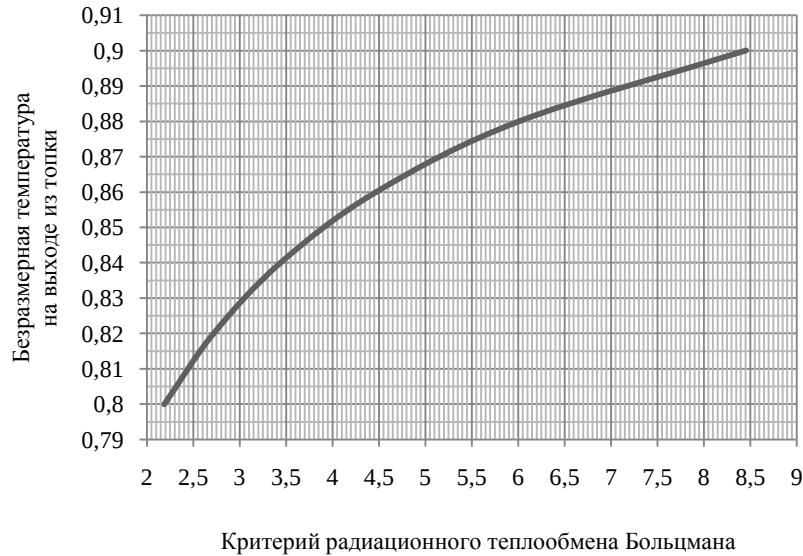


Рис. 1. Зависимость безразмерной температуры на выходе из топки Θ от критерия радиационного теплообмена Больцмана Bo

Анализ рис. 1 показал, что безразмерная температура на выходе из топки котла существенно влияет на интенсивность радиационного теплообмена в камере сгорания котла. В пределах изменения $\Theta = 0,8 \div 0,9$ уровень теплообмена в топочном устройстве повышается в 4 раза, что подтверждает важность учета характеристик ЗАГ в целях обеспечения эффективной организации процесса сжигания топлива.

Эффективное значение критерия поглощательной способности Бугера $B\tilde{u}$ определялось по формуле [8]

$$B\tilde{u} = 1,6 \ln \left(\frac{1,4Bu^2 + Bu + 2}{1,4Bu^2 - Bu + 2} \right), \quad (4)$$

где $Bu = kps$ – критерий поглощательной способности Бугера; k – коэффициент поглощения топочной среды, $1/(м \cdot МПа)$; p – давление в топочной камере, МПа; s – эффективная толщина излучающего слоя, м.

Концентрация оксидов азота в продуктах сгорания мазута для водогрейных котлов учитывает среднеинтегральную температуру $\bar{T}_{заг}$, коэффициент избытка воздуха $\alpha_{заг}$, время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ $\tau_{заг}$, топливный азот $\Delta NO_2^{ТПЛ}$ и рассчитывалась по методике [9]. Расчет содержания БП в продуктах сгорания малозольного мазута выполнялся по отраслевой методике [10].

Рабочий состав высокосернистого мазута, принятый для режимного моделирования топочного процесса, соответствует ГОСТ 10585-2013: $W=0,3\%$, $A=0,048\%$, $S=2,76\%$, $C=84\%$, $H=11,1\%$, $O=2\%$, $N=0,7\%$, теплотворная способность мазута $40,086$ МДж/кг,

содержание сероводорода H_2S не более 4,8 ppm. Технические характеристики для моделирования топочного процесса в номинальном режиме: расход топлива на котел $B_p = 3,1 \text{ кг/с}$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,01 \div 1,06$; присосы холодного воздуха $\Delta\alpha = 0,08$; температура мазута, подаваемого в топку, равна 115°C ; теплота, вносимая в топочную камеру с воздухом $Q_{\text{возд}} = 0,431 \text{ МДж/кг}$; суммарная теплоемкость продуктов сгорания мазута $(Vc)_r = 7,72 \cdot 10^{-3} \text{ МДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$.

Расчетные концентрации NO_2 , SO_2 , БП в дымовых газах и характеристические температуры в ЗАГ котла КВ-ГМ-100(116,3/150), сжигающего малозольный мазут, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Концентрация NO_2 , SO_2 , БП в дымовых газах водогрейного котла

КВ-ГМ-100(116,3/150)

Параметр / тип котла	Водогрейный, газомазутный					
Коэффициент избытка воздуха, α	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06
Концентрация NO_2 в уходящих газах, мг/м^3	209	219	221	232	238	245
Концентрация БП в уходящих газах, мкг/м^3	124	120	116	112	108	104
Концентрация SO_2 в уходящих газах, мг/м^3	2957	2903	2851	2800	2752	2705
Среднеинтегральная температура в зоне активного горения, $\bar{T}_{\text{заг}}$, К	1885	1906	1909	1929	1940	1951
Адиабатическая температура горения мазута, $T_{\text{ад}}$, К	2170	2194	2220	2233	2245	2267
Температура на выходе из зоны активного горения, $T_{\text{заг}}$, К	1281	1289	1293	1300	1306	1311
Время пребывания газов в топке, $\tau_{\text{заг}}$, с	1,049	1,027	1,016	0,995	0,980	0,966

На рис. 2 показана зависимость изменения удельного выхода БП в уходящих газах котла КВ-ГМ-100(116,3/150) от удельного содержания NO_2 в выходном сечении топочного устройства. Анализ рис. 2 позволил сделать вывод, что для горения высокосернистого мазута в результате увеличения α от 1,01 до 1,06 концентрация NO_2 в уходящих газах повышается на 14,7% до значения 245 мг/м^3 . Увеличение концентрации БП в уходящих газах на 1% приводит к сокращению содержания NO_2 в продуктах сгорания на 0,92%.

В ходе расчетных исследований установлено, что концентрация SO_2 в продуктах сгорания мазута значительно (на 26,0–32,3%) превышает нормативные выбросы, ограниченные для котлов, сжигающих мазут, значением 2000 мг/м^3 , что в удельных показателях составляет $0,875 \text{ г/МДж}$ для котлоагрегатов, введенных в эксплуатацию до 31 декабря 2000 года. Содержание сернистого ангидрида при $\alpha = 1,04$ составляет 2800 мг/м^3 , повышение коэффициента избытка воздуха от 1,01 до 1,06 приводит к снижению концентрации SO_2 в уходящих газах на 8,5%. По результатам экспериментальных замеров температура уходящих газов составила 180°C на номинальном режиме работы, при этом объемная концентрация сернистого ангидрида соответствовала 0,0923%. Расчетная температура точки росы для концентрации $\text{SO}_3 = 0,00369\%$ равна 155°C . Приземная концентрация сернистого ангидрида в районе санитарно-защитной зоны электростанции

при работе одного котла КВ-ГМ-100(116,3/150) составила не более $0,016 \text{ мг/м}^3$. Очистка уходящих газов от соединений серы в технологическом процессе не осуществлялась.

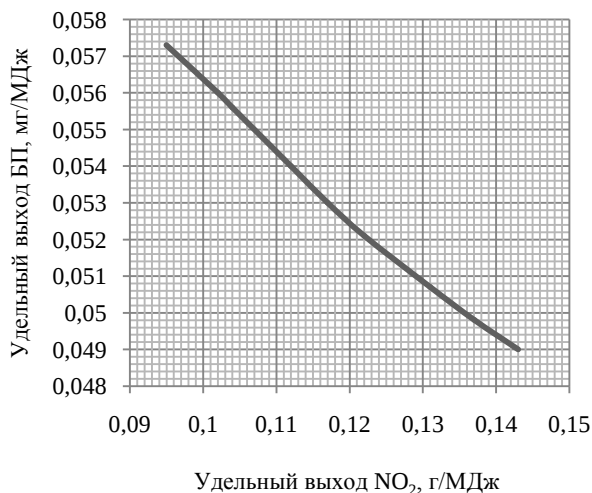


Рис. 2. Удельный выход БП в зависимости от удельного содержания NO_2 в уходящих газах

Обработка полученных результатов моделирования топочных процессов позволила установить функциональную зависимость $K_{\text{БП}} = f(K_{\text{NO}_2})$ (рис. 2) и аппроксимировать её

полиномом 4-й степени с коэффициентом корреляции $R^2 = 1$ в виде выражения

$$K_{\text{БП}} = -1018K_{\text{NO}_2}^4 + 501K_{\text{NO}_2}^3 - 90,87K_{\text{NO}_2}^2 + 7,025K_{\text{NO}_2} - 0,136. \quad (5)$$

Зависимость концентрации соединений БП в продуктах сгорания мазута от относительной тепловой производительности котла КВ-ГМ-100 (116,3/150) показана на рис. 3. Максимальный выход компонентов БП, равный 240 мкг/м^3 , характеризует номинальный режим работы котла, минимальная концентрация БП в уходящих газах составляет 104 мкг/м^3 .

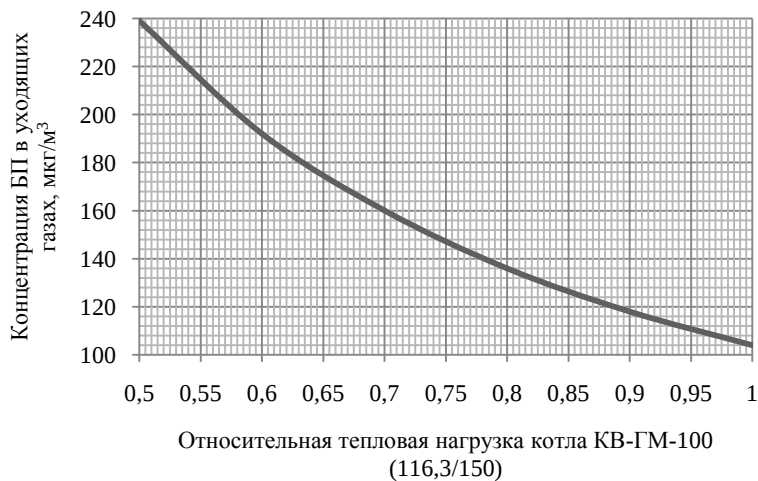


Рис. 3. Концентрация БП в уходящих газах котла КВ-ГМ-100 (116,3/150) в зависимости от относительной тепловой нагрузки

На граф. 2÷5 показаны результаты моделирования режимных характеристик топочного процесса водогрейного котла КВ-ГМ-100 (116,3/150).

Увеличение относительной тепловой нагрузки водогрейного котла положительно влияет на сокращение выхода БП. В условиях повышения тепловой мощности от $0,5\bar{Q}$ до $\bar{Q}$ концентрация БП в дымовых газах снизилась в 2,4 раза (табл. 2).

Таблица 2

Режимные характеристики топочного процесса водогрейного котла
КВ-ГМ-100(116,3/150)

Параметр / тип котла	Водогрейный, газомазутный				
Относительная тепловая нагрузка, $\bar{Q}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Отраженный тепловой поток, $q_{\text{заг}}^{\text{отр}}$, МВт / м ²	0,103	0,124	0,145	0,165	0,186
Удельный выход NO_2 , K_{NO_2} , г/МДж	0,067	0,077	0,088	0,099	0,111
Концентрация NO_2 в уходящих газах, мг/м ³	134	155	177	199	222
Удельный выход БП, $K_{\text{БП}}$, мг/МДж	0,119	0,096	0,080	0,068	0,059
Температура на выходе из зоны активного горения, $T_{\text{заг}}$, К	1105	1156	1201	1241	1278

Эксплуатация котельного оборудования на номинальной нагрузке способствует качественному процессу смесеобразования и, как следствие, более полному выгоранию топлива, что непосредственно влияет на уменьшение выбросов БП в продуктах сгорания (рис. 3).

По результатам обработки полученных результатов моделирования топочных характеристик графическая зависимость $C_{\text{БП}} = f(\bar{Q})$ (рис. 3) была аппроксимирована степенной функцией с коэффициентом корреляции $R^2 = 1$:

$$C_{\text{БП}} = 104 \cdot \bar{Q}^{-1,2}. \quad (6)$$

На рис. 4 показана зависимость влияния отраженного теплового потока на время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ топочной камеры котла КВ-ГМ-100 (116,3/150).

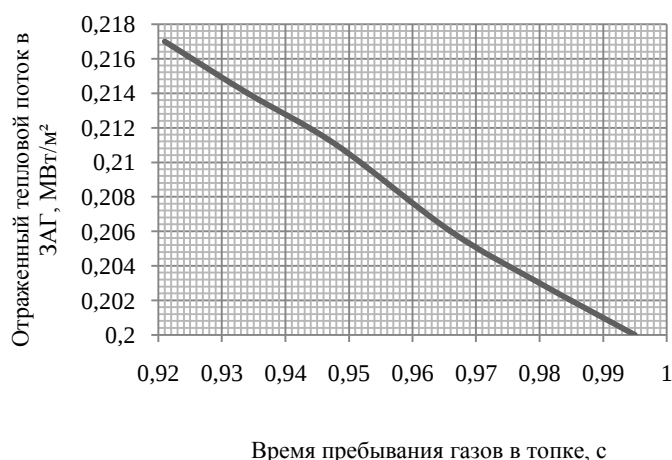


Рис. 4. Влияние отраженного теплового потока на время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ топочной камеры котла

Затягивание процесса горения мазута позволяет снизить содержание NO_2 в уходящих газах. Уменьшение теплового потока в ЗАГ на 1% повышает время пребывания газов в топочной камере на 10 мс. Режимное регулирование выбросов оксидов азота и БП связано с подводом в топочную камеру (отводом из камеры) дополнительной энергии от предварительного подогрева мазута (частичное или полное предварительное смесеобразование), рециркуляции продуктов сгорания, впрыска в топочную камеру влаги в виде жидкости или пара. Установлено, что значимый уровень сокращения загрязняющих атмосферу веществ достигается за счет использования режимов, основанных на прямом или косвенном воздействии на температуру в ЗАГ котла, при этом достигается снижение концентрации БП в продуктах сгорания в 2–5 раз.

Зависимость удельного выхода оксидов азота от отраженного теплового потока в ЗАГ показан на рис. 5.

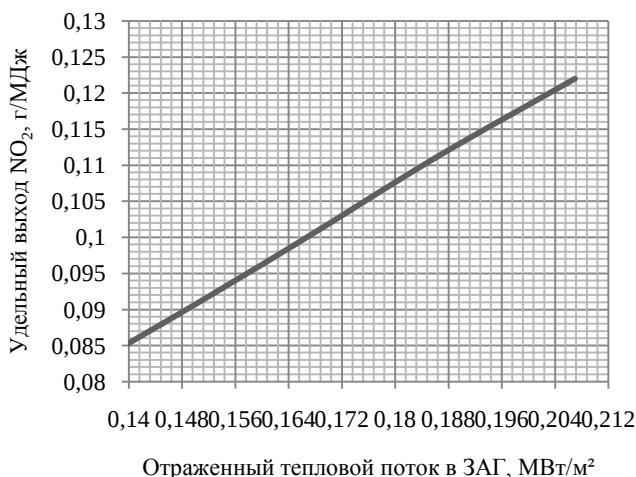


Рис. 5. Удельный выход оксидов азота в зависимости от отраженного теплового потока в ЗАГ

Увеличение отраженного теплового потока в ЗАГ в диапазоне от 0,140 до 0,207 МВт/м² привело к повышению удельного выхода NO_2 на 30,3%, что объясняется ростом тепловыделения в топочной камере и интенсивности образования термических оксидов азота. Максимальный тепловой поток характеризовался в данных условиях номинальным режимом работы водогрейного котла.

Выводы

Определена среднеинтегральная температура дымовых газов в ЗАГ и адиабатная температура горения мазута в топочном процессе водогрейного котла КВ-ГМ-100 (116,3/150) в пределах эксплуатационных режимных нагрузок. Показано, что в условиях увеличения температуры в зоне активного горения топки котла содержание БП в продуктах сгорания мазута снижается, что объясняется повышением общего уровня тепловыделения и полноты выгорания мазута в топочной камере.

Установлена упрощенная математическая зависимость для расчета критерия Больцмана Bo с учетом безразмерной температуры топочных газов на выходе из котла Θ и относительного положения факела по высоте топочной камеры M .

Получены новые данные о содержании в продуктах сгорания водогрейных котлов ПАУ, представленных бенз(а)пиреном, для разработки малоэмиссионных режимов работы и составления на их основе режимных карт эксплуатации энергоустановок.

По результатам обработки результатов численного эксперимента установлены зависимости содержания БП в уходящих газах от удельного выхода оксидов азота и

тепловой нагрузки энергоустановки, пригодные в процессе эксплуатации водогрейных котельных установок для проведения пуско-наладочных мероприятий и настройки режимов эффективного сжигания топлива.

Литература

1. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компоновка и тепловой расчет парового котла: учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 298 с.: ил.
2. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Фокин В.М. и др. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 27 (46). С. 28–33.
3. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Грига С.А. и др. Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 28 (47). С. 143–150.
4. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Прохоров В.Б. и др. Оптимизация режимов сжигания мазута в топках котлов большой мощности // Теплоэнергетика. 2007. № 6. С. 23–26.
5. Таймаров М.А., Егоров В.А. Исследование схем сжигания мазута на котле ТГМ-84Б с использованием механических форсунок // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 10. С. 96–97.
6. Таймаров М.А., Кувшинов Н.Е., Чикляев Д.Е. и др. Регулирование выбросов окислов азота при сжигании мазута в котлах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 40–44.
7. Тугов А.Н., Супранов В.М., Изюмов М.А. и др. Оценка возможности перевода котлов ТП-108 на сжигание природного газа и мазута // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 68–76. DOI: 10.1134/S0040363617030092
8. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург. 1998. 257 с.
9. РД 153-34. 02. 304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. М.: ОАО «ВТИ». 2003.
10. РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. М.: ОАО «ВТИ». 2003.

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. Lipov Ju.M., Samojlov Ju.F., Vilenskij T.V. Komponovka i teplovoj raschet parovogo kotla. Uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Jenergoatomizdat, 1988. 298 p.: il.
2. Ivanickij M.S., Griga A.D., Fokin V.M. i dr. Fiziko-himicheskie processy mehanizmov obrazovanija benz(a)pirena pri szhiganii uglevodorodnogo topliva. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitektarno-stroitel'nogo universiteta. 2012. No. 27 (46). P. 28–33.
3. Ivanickij M.S., Griga A.D., Griga S.A. i dr. Postroenie modeli dlja opredelenija koncentracii benz(a)pirena pri szhiganii uglevodorodnogo topliva v kotel'nyh ustanovkah sistem teplosnabzhenija. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitektarno-stroitel'nogo universiteta. 2012. No. 28 (47). P. 143. 150.
4. Zrojchikov N.A., Lyskov M.G., Prohorov V.B. i dr. Optimizacija rezhimov szhiganiya mazuta v topkakh kotlov bol'shoj moshhnosti. Teplojenergetika. 2007. No. 6. P. 23–26.

5. Tajmarov M.A., Egorov V.A. Issledovanie shem szhiganiya mazuta na kotle TGM-84B s ispol'zovaniem mehanicheskikh forsunok // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2012. V. 15. No. 10. P. 96–97.

6. Tajmarov M.A., Kuvshinov N.E., Chikljaev D.E. i dr. Regulirovanie vybrosov okislov azota pri szhiganii mazuta v kotlah. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2016. No. 3-4. P. 40–44.

7. Tugov A.N., Supranov V.M., Izjumov M.A. i dr. Ocenka vozmozhnosti perevoda kotlov TP-108 na szhiganie prirodnogo gaza i mazuta. Teplojenergetika. 2017. No. 3. P. 68–76. DOI: 10.1134/S0040363617030092.

8. Teplovoj raschet kotlov (Normativnyj metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg. 1998. 257 p.

9. RD 153-34. 02. 304-2003. Metodicheskie ukazaniya po raschetu vybrosov oksidov azota s dymovymi gazami kotlov teplovyh jelektrostantsij. M.: OAO «VTI». 2003.

10. RD 153-34. 1-02. 316-2003. Metodika rascheta vybrosov benzpirena v atmosferu parovymi kotlami jelektrostantsij. M.: OAO «VTI». 2003.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – 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

24 июля 2017 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ СМЕСЕЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКЕ

А.С. Должиков, В.И. Могорычный

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2543-6084>, DolzhikovAS@mpei.ru

Резюме: Работа посвящена исследованию процесса кипения многокомпонентных рабочих тел, используемых в холодильной и криогенной технике. Представлены описание методики определения коэффициента теплоотдачи при кипении зеотропных смесей в горизонтальном обогреваемом канале и конструкция экспериментального стенда, позволяющего производить подобные измерения. Данный стенд сконструирован на базе холодильной установки, работающей по дроссельному циклу Джоуля-Томсона, и позволяет измерять коэффициент теплоотдачи с погрешностью, не превышающей 15%. Знание коэффициента теплоотдачи будет очень полезным при проектировании теплообменников для холодильных машин, работающих на смесевом хладагенте.

Ключевые слова: низкая температура, кипение, теплообмен, смеси, многокомпонентное рабочее тело, двухфазный поток, дроссельная система.

EXPERIMENTAL STAND FOR INVESTIGATION BOILING OF MIXTURES USED IN LOW-TEMPERATURE TECHNIQUE

A.S. Dolzhikov, V.I. Mogorychny

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2543-6084>, DolzhikovAS@mpei.ru

Abstract: The work is devoted to the study of the boiling process of multicomponent working fluids (MWF) used in refrigeration and cryogenic engineering. The description of the method of determination of heat transfer coefficient during boiling of zeotropic mixtures in horizontal heated channel is given as well as the design of the experimental stand allowing to make such measurements. This stand is designed on the basis of a refrigeration unit operating on the Joule-Thomson throttle cycle and allows to measure the heat transfer coefficient with an error not exceeding 15 %. Knowing of the heat transfer coefficient will be very useful in the design of heat exchangers for refrigeration machines operating on a mixed refrigerant.

Keywords: low temperature, boiling, heat exchange, mixture, multicomponent working fluids, two-phase flow, throttle system.

Введение

В криогенной и холодильной технике широкое применение получили системы, работающие на основе дроссельного цикла, благодаря надежности, простоте устройства и эксплуатации и, как следствие, невысокой стоимости. Одним из перспективных путей повышения эффективности дроссельных циклов является применение многокомпонентных

рабочих тел (МРТ), которые составляют путем смешения традиционно применяемых или новых синтезированных однокомпонентных веществ. В отечественных и зарубежных исследованиях показано, что при работе низкотемпературных систем на таких смесях во многих случаях улучшаются энергетические и массогабаритные характеристики, увеличивается ресурс и повышается надежность работы, сокращается пусковой период [1–3].

Одним из основных элементов дроссельного цикла (в частности цикла Линде) являются теплообменники. В одном из них (рекуперативный теплообменник) обратный поток охлаждает прямой поток (осуществляется регенерация холода), в результате чего в каналах, соответственно, происходит непрерывное кипение и конденсация МРТ. Другой теплообменник является испарителем, к которому подводится нагрузка от охлаждаемого объекта. Таким образом, в потоках теплообменников непрерывно осуществляется фазовый переход, рабочее тело находится в двухфазном состоянии. Перепад температур (изменение температуры потока между входом и выходом теплообменника) может составлять более 100 К, что, в свою очередь, сказывается на сильном изменении теплофизических свойств потока рабочего тела. Также очень сильно меняется доля жидкой и паровой фаз в потоке, что влияет на наблюдаемые режимы течения потока в каналах теплообменника. Вследствие этого использование МРТ накладывает определенные требования на допустимые скорости потоков в каналах. При недостаточной скорости потока может произойти расслоение смеси: паровая фаза окажется наверху, а жидкая – внизу, что приведет к нарушению фазового равновесия и, как следствие, к ухудшению работы теплообменников [4–7].

В настоящее время в открытых литературных источниках существует мало работ, посвященных исследованию процессов кипения и конденсации МРТ в области низких температур (<140 К). Известно две работы, в которых исследовались смеси, состоящие из трех и более компонентов [8; 9], а также ряд работ, выполненных для бинарных смесей [10]. Большинство методик, разработанных для смесей, основано на соотношениях, используемых для чистых веществ, с включением в них поправок, учитывающих многокомпонентность рабочего тела. Однако данные, полученные с помощью этих соотношений, носят частный характер и применимы для конкретной смеси и параметров потока. Таким образом, отсутствует информация об универсальной методике расчета процессов кипения и конденсации при работе на смесевых хладагентах даже для относительно простых и наиболее часто применяемых в дроссельных системах теплообменников типа «труба в трубе».

Целью данной работы является описание экспериментального стенда, позволяющего производить измерение коэффициента теплоотдачи двухфазного потока МРТ, кипящего при низких температурах.

Методика определения коэффициента теплоотдачи

Способ определения коэффициента теплоотдачи должен быть простым с точки зрения технической реализации, и в то же время являться достаточно точным. К экспериментальному участку известной геометрии подводится заданное количество тепла. Измеряя распределение температур вдоль стенки и температуру потока рабочего тела, из уравнения теплопередачи можно определить значение коэффициента теплоотдачи (рис. 1).

Аналитическое выражение для определения коэффициента теплоотдачи имеет вид [5]:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{exp}} &= \frac{Q}{\Delta T_{\text{лог}} F}; \\ F &= \pi d_{\text{вн}} L_{\text{наг}}; \\ \Delta T_{\text{лог}} &= \frac{\Delta T_{\text{ст-вх}} - \Delta T_{\text{ст-вых}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{ст-вх}}}{\Delta T_{\text{ст-вых}}}\right)}; \\ \Delta T_{\text{ст-вх}} &= T_{\text{ст}} - T_{\text{вх}}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta T_{\text{ст-вых}} = T_{\text{ст}} - T_{\text{вых}} ;$$

$$Q = UI ,$$

где F – площадь внутренней поверхности нагревателя, к которой производится подвод тепла; $d_{\text{вн}}$ и $L_{\text{наг}}$ – внутренний диаметр и длина нагревателя, соответственно; $\Delta T_{\text{лог}}$ – среднелогарифмический температурный напор; $\Delta T_{\text{ст-вх}}$ и $\Delta T_{\text{ст-вых}}$ – перепад температур между потоком рабочего тела и стенкой нагревателя на входе и выходе из него, соответственно; Q – тепловая мощность, выделяющаяся при прохождении электрического тока по проводнику; U и I – значения напряжения и тока соответственно.

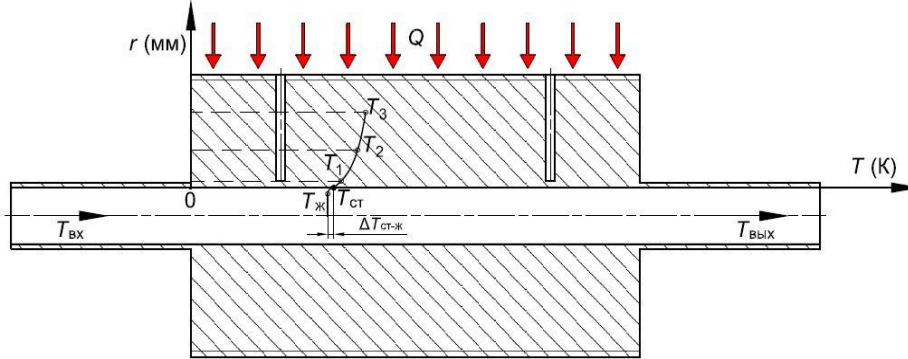


Рис. 1. Методика определения коэффициента теплоотдачи:

r – радиус; $T_{\text{вх}}$ – температура потока на входе; $T_{\text{вых}}$ – температура потока на выходе; $T_{\text{ж}}$ – среднее значение температуры потока; T_1, T_2, T_3 – измеренные значения температур, используемые для определения экстраполяционного значения температуры стенки; $T_{\text{ст}}$ – температура стенки; $\Delta T_{\text{ст-ж}}$ – разность температур между поверхностью стенки и потоком

Температура потока на входе и выходе экспериментального участка измеряется напрямую датчиками температуры. Значение температуры стенки нагревателя определяется из выражения, полученного из уравнения теплопередачи через цилиндрическую стенку [5], путем экстраполяции измеренного распределения температур в радиальном направлении стенки нагревателя:

$$T_{\text{ст}} = T_1 - T_3 \frac{\ln(\frac{r_1}{r_{\text{ст}}})}{\ln(\frac{r_3}{r_{\text{ст}}})} \bigg/ 1 - \frac{\ln(\frac{r_1}{r_{\text{ст}}})}{\ln(\frac{r_3}{r_{\text{ст}}})}, \quad (2)$$

где r_1, r_3 и $r_{\text{ст}}$ – радиус положения термопар 1, 3 и стенки относительно продольной оси нагревателя соответственно.

Экспериментальный участок

Количество подводимого тепла должно быть таким, чтобы вызвать достаточный для фиксирования датчиками градиент температур в радиальном направлении и в то же время не привести к сильному изменению температуры потока рабочего тела между входом и выходом экспериментального участка, что сказывается на сильном изменении его теплофизических свойств, режима течения, механизма теплоотдачи.

В результате было решено изготавливать экспериментальный участок из нержавеющей стали, так как она обеспечивает наибольший градиент температур в радиальном направлении из всех наиболее широко распространённых конструкционных материалов вследствие того, что обладает меньшей теплопроводностью.

Экспериментальный участок состоит из двух одинаковых, соединенных вместе, нагревательных элементов. Каждый нагревательный элемент представляет собой толстостенный цилиндр из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с намотанной на него

нихромовой проволокой, при протекании тока по которой происходит подвод нагрузки к участку. Внутри цилиндра находится сквозное отверстие для прохождения потока рабочего тела. Параметры нагревательных элементов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры нагревательных элементов

Параметр	Значение	Ед. изм-я	Инструмент измерения
Внутренний диаметр канала ($d_{\text{вн}}$)	$6 \pm 0,1$	мм	штангенциркуль
Наружный диаметр канала ($d_{\text{нар}}$)	$7 \pm 0,1$	мм	штангенциркуль
Толщина стенки канала (th)	$0,5 \pm 0,003$	мм	микрометр
Шероховатость (R_{rms})	$0,4 \pm 0,01$	мкм	микроскоп
Длина нагреваемой части ($L_{\text{нар}}$)	$50 \pm 0,1$	мм	штангенциркуль
Наружный диаметр блока ($D_{\text{нар}}$)	$30 \pm 0,1$	мм	штангенциркуль
Диаметр отверстий под установку термопар	$1 \pm 0,1$	мм	сверло и станок
Положение 1-й термопары	$3,7 \pm 0,1$	мм	глубиномер
Положение 2-й термопары	$7 \pm 0,1$	мм	глубиномер
Положение 3-й термопары	$11 \pm 0,1$	мм	глубиномер

Нагревательный элемент схематично изображен на рис. 2 в виде толстостенного цилиндра высотой 50 и диаметром 30 мм. Для удобства наматывания нихромовой проволоки на наружной поверхности блока имеется резьба, в пазы которой укладывается провод. Для прохождения потока рабочего тела в нагревателе предусмотрено сквозное отверстие диаметром 6 мм. В толстостенной части цилиндра, с отступом 10 мм от каждого края, в радиальном направлении просверлены три отверстия, диаметром 1 мм каждое, для установки термопар. Внутренняя поверхность канала диаметром 6 мм подвергается обработке шлифованием, чтобы уменьшить шероховатость поверхности, влияющую на структуру течения потока рабочего тела.

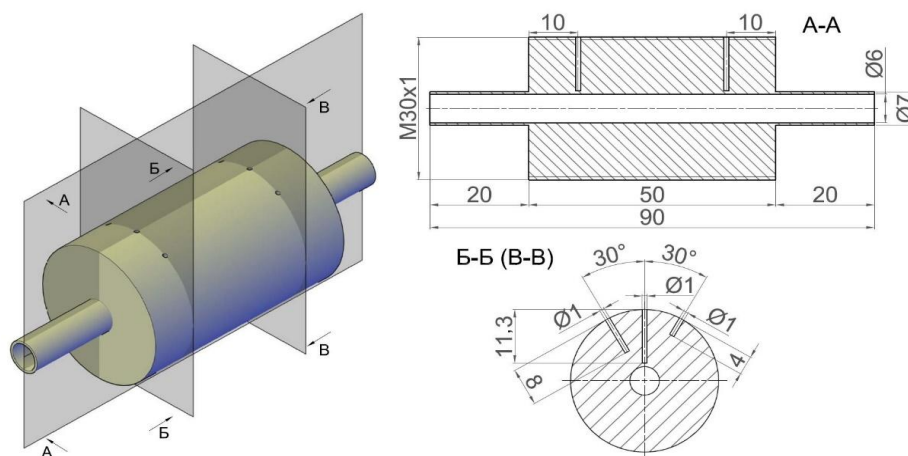


Рис. 2. Нагреватель: общий вид

Между собой нагреватели соединены с помощью муфты, имеющей такой же внутренний диаметр и выполненной из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для измерения давления и контроля температуры потока на входе и выходе экспериментального участка предусмотрены коннекторы. Они изготовлены из стали 12Х18Н10Т. Каждый коннектор имеет сверху отверстие, в которое впаивается штуцер для установки датчика давления. Сквозное отверстие имеет тот же диаметр, что и диаметр канала для прохождения потока рабочего тела, 6 мм. Соосно, на небольшом удалении, имеется цилиндрический паз для

установки платиновых термометров сопротивления (ПТС), которые служат для измерения температуры потока рабочего тела.

С одной стороны коннектор соединяется с нагревателем, а с другой – с участком трубопровода потока рабочего тела. В результате экспериментальный участок представляет собой последовательное соединение коннекторов и нагревателей, соединенных между собой муфтами (рис. 3).

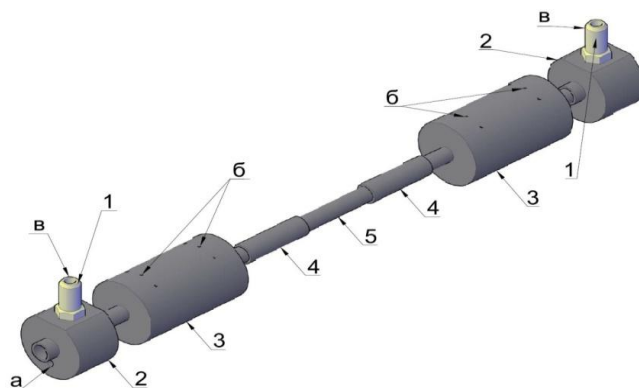


Рис. 3. Экспериментальный участок: общий вид: 1 – штуцер;
2 – коннектор; 3 – нагреватель; 4 – муфта; 5 – трубка; места установки: а – ПТС;
б – термопары; в – датчики давления

Экспериментальный участок в сборе (рис. 4) установлен после дросселя холодильной машины, непосредственно прямо перед испарителем. Он помещен в охлаждаемую низкотемпературную камеру, что позволяет снизить теплопритоки из окружающей среды. Также на него намотана многослойная изоляция.



Рис. 4. Экспериментальный участок в сборе

Основная часть тепла, подводимого к экспериментальному участку, передаётся потоку рабочего тела. Однако за счет наличия конвективного и радиационного теплообмена с окружающим пространством камеры имеют место тепловые потери (рис. 5). Для их оценки производят сравнение значения теплового потока, измеренного по показаниям мультиметра, с фактическим значением, полученным из теплового баланса участка, путем перемножения массового расхода на теплоемкость и разность температур потока на входе и

выходе из него. Как видно из рис. 5, подведенное тепло практически полностью передается потоку рабочего тела. Тепловые потери несколько возрастают только когда через экспериментальный участок проходит полностью жидкий или газообразный поток. Это связано со снижением коэффициента теплоотдачи, что приводит к увеличению температуры нагревателя и, соответственно, к возрастанию тепловых потерь. В двухфазной области тепловые потери составляют менее 0,5% от подводимого теплового потока, в то время как для газового потока они достигают почти 3%. Следует заметить, что основным объектом исследования является двухфазная область, где потери будут наименьшими.

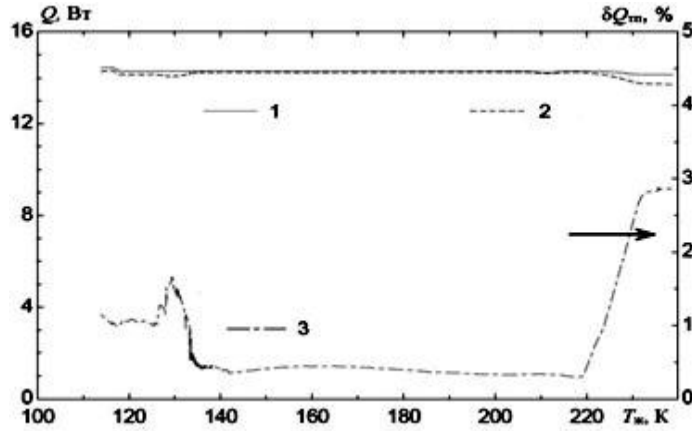


Рис. 5. Тепловые потери на экспериментальном участке:
1 – тепловой поток, подводимый к экспериментальному участку; 2 – тепловой поток, доходящий до рабочего тела; 3 – тепловые потери

Относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи равна сумме относительных погрешностей измеряемых величин:

$$\begin{aligned}\delta\alpha_{\text{exp}} &= \delta Q + \delta\Delta T_{\text{лог}} + \delta F; \\ \delta Q &= \delta Q_{\text{изм}} + \delta Q_{\text{тп}}; \\ \delta\Delta T_{\text{лог}} &= \frac{\Delta T_{\text{ст}} + \Delta T_{\text{ж}}}{T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}},\end{aligned}\quad (3)$$

где δQ – относительная погрешность определения теплового потока; $\delta Q_{\text{изм}}=1\%$ – относительная погрешность, связанная с измерением тока и напряжения, определяющих величину теплового потока; $\delta Q_{\text{тп}}=0,5\%$ – относительная погрешность, связанная с тепловыми потерями; $\delta\Delta T_{\text{лог}}$ – относительная погрешность определения температурного напора; $\Delta T_{\text{ж}}=0,18$ К – абсолютная погрешность измерения температуры потока рабочего тела термометром сопротивления; $\Delta T_{\text{ст}}=0,68$ К – абсолютная погрешность измерения температуры стенки с учетом погрешности измерения термопары, отвода тепла по проводам, ошибки определения положения коронки термопары.

В большинстве опытов перепад температур между стенкой и потоком рабочего тела составлял 10 К и больше. Таким образом, получаем $\delta\Delta T_{\text{лог}}=8,6\%$. Относительную погрешность определения площади поверхности нагрева δF можно не учитывать, так как она мала по сравнению с другими составляющими. В итоге получается, что относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи составляет $\delta\alpha_{\text{exp}}=10,1\%$. Принимая во внимание то, что могли быть учтены не все источники погрешности и в некоторых экспериментах наблюдается меньшая разность температур между стенкой и потоком, можно сказать, что данный экспериментальный стенд позволяет определять коэффициент теплоотдачи с точностью более 15%.

Участок измерения расхода

Ввиду того, что промышленно выпускаемые расходомеры имеют высокую стоимость и зачастую не подходят для конкретного случая, было принято решение самостоятельно спроектировать и изготовить участок измерения расхода (рис. 7).

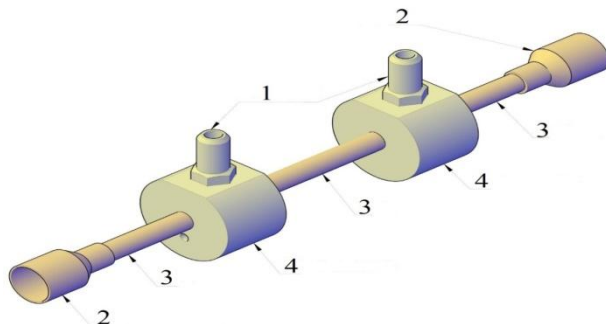


Рис. 7. Участок измерения расхода: общий вид 1 – штуцер; 2 – переходник; 3 – трубка; 4 – коннектор

Данный участок устанавливается на линии потока низкого давления, перед компрессором. Таким образом, через данный участок будет проходить газовый поток и можно будет воспользоваться уравнением Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho u^2 L}{2 d}, \quad (4)$$

где ΔP – перепад давления, Па; ξ – коэффициент трения; ρ – плотность потока рабочего тела, кг/м³; u – скорость потока на участке, м/с; L, d – соответственно длина и внутренний диаметр участка, мм.

Для газовых потоков используемых рабочих тел, с учетом их теплофизических свойств, а также геометрии участка, вероятнее всего будет наблюдаться турбулентный режим течения. В таком случае коэффициент трения ξ определяется следующим образом [4]:

$$\xi = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (5)$$

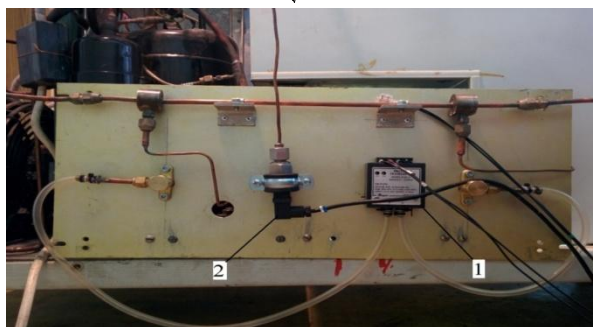


Рис. 8. Участок измерения расхода в сборе: 1 – датчик перепада давления; 2 – датчик давления

Массовый расход потока, кг/с определяется из выражения [4]

$$G = \rho u S, \quad (6)$$

где S – площадь проходного сечения участка.

С учетом известной геометрии участка можно получить окончательное выражение для определения расхода через перепад давления на участке и теплофизические свойства потока (7):

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 \Delta P \rho d^5}{8L\xi}}. \quad (7)$$

Данный способ измерения расхода можно считать достаточно точным, так как он зависит только от перепада давления и теплофизических свойств. Погрешность определения теплофизических свойств можно не учитывать, так как температура и давление измеряются с достаточной точностью. Погрешность измерения перепада давления тоже невелика и составляет 1% от измеряемой величины. Таким образом, погрешность определения расхода данным методом также будет находиться в пределах 1% от измеряемой величины.

Вышеописанные участки (экспериментальный и измерения расхода) установлены в холодильной машине, работающей по дроссельному циклу Джоуля-Томсона (рис. 8).

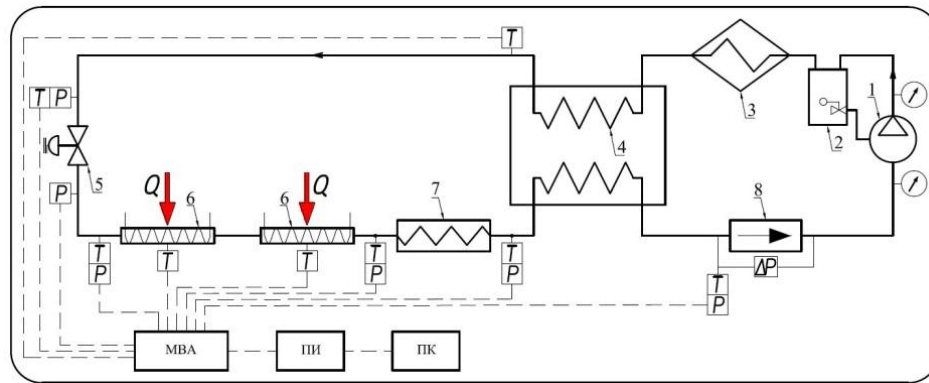


Рис. 9. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – компрессор; 2 – маслоотделитель; 3 – конденсатор; 4 – рекуперативный теплообменник; 5 – дроссель; 6 – экспериментальный участок; 7 – испаритель; 8 – участок измерения расхода; МВА – модуль ввода аналоговый; ПИ – преобразователь интерфейса; ПК – компьютер; Т – датчик температуры; Р – датчик давления; ΔР – датчик перепада давления

Основными частями установки являются компрессорный блок и низкотемпературная камера. Компрессорный блок состоит из компрессора – 1, сжимающего поток рабочего тела; маслоотделителя – 2, возвращающего масло обратно в компрессор из потока рабочего тела; конденсатора – 3, охлаждающего поток рабочего тела перед входом его в низкотемпературную камеру. Перед входом в компрессор установлен участок измерения расхода – 8. Низкотемпературная камера состоит из следующих элементов: рекуперативного теплообменника – 4, в котором осуществляется регенерация холода: обратный поток охлаждает прямой, тем самым улучшая энергетические характеристики цикла; дросселя – 5, на котором снижается давление и, тем самым, происходит охлаждение потока рабочего тела; экспериментального участка и испарителя – 7, служащего для поддержания низкой температуры в камере и снижения теплопритоков к экспериментальному участку. Установка снабжена системой автоматического сбора информации, позволяющей сразу сохранять экспериментальные данные на компьютере. В зависимости от состава смеси и необходимого температурного уровня, время выхода установки на режим составляет 20–40 мин.

Выводы

Спроектированный экспериментальный стенд позволяет получать с хорошей точностью (лучше $\pm 15\%$) экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи при кипении смесей, используемых в низкотемпературной технике. Это даст возможность в ближайшее время увеличить количество экспериментальных данных по кипению МРТ и сделать шаг к более точному пониманию протекания данного процесса.

Литература

1. Лунин А.И., Могорычный В.И., Коваленко В.Н. Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике. Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. 100 с.
2. Skye H., Nellis G., Klein S. ASHRAE Trans. 2009. Vol. 115. P. 966–983.
3. Ardhapurkar P.M., Sridharan A., Atrey M.D. Appl. Therm. Eng. 2014. Vol. 66. P. 94–103.
4. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. Москва: Издательство МЭИ, 2007. 384 с.
5. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. 542 с.
6. Кириллин В.А. Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. 496 с.
7. Баттерворс Д., Хьюитт Г. Теплопередача в двухфазном потоке. Москва: Энергия, 1980. 328 с.
8. Barraza R., Nellis G. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. P. 683–695.
9. Baek S., Lee C., Jeong S. Cryogenics. 2014. Vol. 64. P. 29–39.
10. Dongsheng C., Yumei S. Cryogenics. 2013. Vol. 58. P. 45–54.

Авторы публикации

Должиков Антон Сергеевич – аспирант кафедры низких температур НИУ «МЭИ». E-mail: DolzhikovAS@mpei.ru.

Могорычный Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры низких температур НИУ «МЭИ».

References

1. Lunin A.I., Mogorychny V.I., Kovalenko V.N. The use of multicomponent working bodies in low-temperature technology. Moscow: Publishing house MPEI, 2009. 100 p.
2. Skye H., Nellis G., Klein S. ASHRAE Trans. 2009. Vol. 115. P. 966–983.
3. Ardhapurkar P.M., Sridharan A., Atrey M.D. Appl. Therm. Eng. 2014. Vol. 66. P. 94–103.
4. Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mechanics of two-phase systems. Moscow: Publishing house MPEI, 2007. 384 p.
5. Yagov V.V. Heat transfer in single-phase media and in phase transformations. Moscow: Publishing house MPEI, 2014. 542 p.
6. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E. Technical thermodynamics. Moscow: Publishing house MPEI, 2008. 496 p.
7. Butterworth D., Hewitt G.F. Two-phase flow and heat transfer. London: Oxford University Press, 1977. 328 p.
8. Barraza R., Nellis G. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. P. 683–695.
9. Baek S., Lee C., Jeong S. Cryogenics. 2014. Vol. 64. P. 29–39.
10. Dongsheng C., Yumei S. Cryogenics. 2013. Vol. 58. P. 45–54.

Authors of the publication

Dolzhikov Anton Sergeevich – PhD student of the low temperature department, Moscow power engineering Institute. DolzhikovAS@mpei.ru.

Mogorychny Vladimir Ivanovich – Cand. Sci. (Techn.), associate professor of “Low temperature” department, Moscow power engineering Institute.

Поступила в редакцию

08 июля 2017 г.

УДК 504.05

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

*А.М. Гафуров¹, Б.М. Осипов¹, Р.З. Гатина², Н.М. Гафуров²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Резюме: В статье рассматриваются возможные пути снижения выбросов углекислого газа, особенности технологий извлечения CO₂ из дымовых газов. Проанализирован зарубежный опыт использования CO₂. Определены возможные области применения CO₂ в качестве рабочего тела для различных тепловых двигателей и термодинамических циклов. Исследованы термодинамические и теплофизические свойства углекислого газа.

Ключевые слова: глобальное потепление, выбросы углекислого газа, использование диоксида углерода, тепловой двигатель, термодинамический цикл.

POSSIBLE WAYS OF DECREASE IN EMISSIONS OF CARBON DIOXIDE GAS

*A.M. Gafurov¹, B.M. Osipov¹, R.Z. Gatina², N.M. Gafurov²

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

²Kazan national research technological university, Kazan, Russia

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Abstract: In article possible ways of decrease in emissions of carbon dioxide gas are considered. Features of technologies of extraction of CO₂ from flue gases. Foreign experience of use of CO₂ is analyzed. Possible ranges of application of CO₂ as working medium for different heat engines and thermodynamic cycles are defined. Thermodynamic and heatphysical properties of carbon dioxide gas are investigated.

Keywords: global warming, emissions of carbon dioxide gas, use carbon dioxide, heat engine, thermodynamic cycle.

Основным фактором влияния на глобальное потепление является эмиссия парниковых газов, в первую очередь углекислого газа (CO₂). Именно по этой причине CO₂ был выбран в качестве базисного газа при расчётах потенциала глобального потепления, который принимается равным 1. Соответственно степень влияния на глобальное потепление прочих парниковых газов сравнивается с воздействием CO₂.

Надо отметить также, что наиболее высоким потенциалом глобального потепления обладают синтетические холодильные агенты – фреоны, широко используемые в системах холодоснабжения и кондиционирования.

Для решения проблемы глобального потепления в 1997 г. был принят Киотский протокол, который обязывает развитые страны и страны с переходной экономикой сократить или стабилизировать выбросы парниковых газов.

Примерная оценка динамики выбросов парниковых газов в России (не включая

поглощение CO₂ лесами) и эффективности потенциально возможных мер по снижению выбросов в отдельных секторах экономики показана на рис. 1 [1].

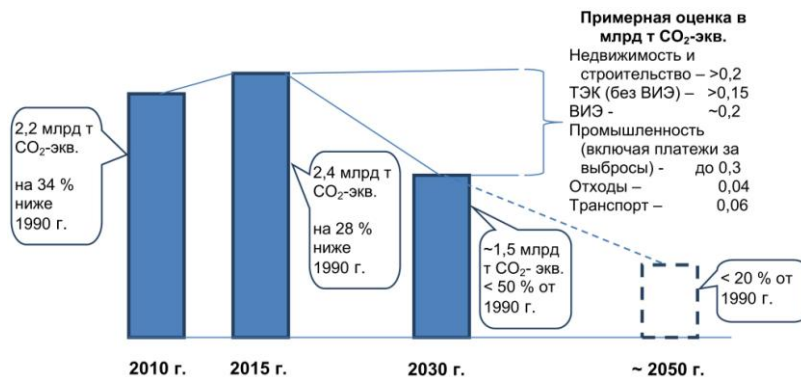


Рис. 1. Примерная оценка динамики выбросов парниковых газов в России

Показатели общего уровня выбросов парниковых газов в России с 2010 по 2015 г. возросли до 2,4 млрд. т CO₂-эквивалента; в основном это связано с вводом новых мощностей на тепловых электростанциях для удовлетворения все возрастающего объема электропотребления. К 2030 г. планируется снизить показатели выбросов парниковых газов примерно до уровня 1,5 млрд. т CO₂-эквивалента. Именно такая динамика нужна для достижения к 2050 году уровня выбросов, ведущего к решению проблемы антропогенного изменения климата.

Сегодняшний повышенный интерес к технологиям улавливания и хранения CO₂ (CO₂ capture and storage, CCS) связан со снижением выбросов CO₂, когда нет реальных возможностей радикально сократить масштабы сжигания углеводородного топлива. В отличие от других технологий, CCS не экономит топливо и не содействует решению иных задач, кроме проблемы изменения климата.

Технология включает улавливание и сепарирование CO₂, транспортировку, и собственное закачивание и хранение. В принципе ни один из компонентов не связан с разработкой каких-то новых технологических решений, но долгосрочное захоронение огромных объемов – задача не дешевая и энергоемкая. Известно, что углекислый газ образуется при самых разнообразных процессах (например, брожении, гниении, дыхании), но одним из основных источников углекислого газа являются промышленные выбросы, образующиеся при сжигании твердых, жидких и газообразных топлив. Поэтому установки для сепарации (отделения CO₂ из выбросов) делают технологию относительно рентабельной только для крупных источников. Относительно высокая стоимость транспортировки заставляет искать подземные резервуары недалеко от источника выбросов, причем обязательно глубокие, от 600 м и более. Поэтому в будущем можно ожидать применения CCS на крупных современных угольных станциях, что особенно актуально для Китая, где около 80% тепловых электростанций работают на угле, который сжигается без предварительной очистки, что является главным источником загрязнения воздуха и постоянного смога в стране [2].

Основными компонентами дымовых газов являются азот, углекислый газ и пары воды. Пары воды не представляют какой-либо ценности и удаляются из дымового газа соприкосновением с охлаждаемыми поверхностями. Извлечение углекислого газа, как правило, производится абсорбционно-десорбционным способом с использованием в качестве абсорбента водного раствора моноэтаноламина. Количество углекислого газа CO₂, которое можно получить из дымовых газов, зависит от вида сжигаемого топлива (табл. 1) [3].

Таблица 1

Примерные показатели извлечения CO₂ из дымовых газов

Вид сжигаемого топлива	Количество CO ₂ при сжигании 1 м ³ или 1 кг топлива
Природный газ (метан)	1,9
Каменный уголь	2,1–2,7
Пропан, дизтопливо, мазут, печное топливо	3,0
Газ, выделяющийся из сточных вод	3,7

Вероятно, применение CCS начнется со смежных технологий, в частности использования CO₂ для лучшего извлечения нефти, газа или угольного метана. Здесь основной вопрос – возможные утечки CO₂ в атмосферу, особенно пока нет опыта длительной эксплуатации.

Также выдвигают идеи CCS, связанные с закачкой жидкого или газообразного CO₂ в глубокие слои океана. В принципе, в океане может быть растворено огромное количество CO₂, которое практически не будет выходить в атмосферу. Как вариант, CO₂ может по трубопроводам закачиваться в глубоководные впадины и образовывать своего рода озера. Пока данная идея находится в стадии начальной разработки и анализа воздействия на океанские экосистемы.

Но уже сейчас можно сказать, что вариант использования океана для растворения огромного количества CO₂ не позволит в будущем развивать такие технологии как волновая и градиент-температурная энергетика океанов (рис. 2), так как использование данных технологий уже сейчас способствует выделению огромного количества углекислоты, снижению давления, нагреву глубинных вод и остыванию вод поверхностных слоев. По расчетам NASA из волновой энергии океана ежегодно можно извлекать более 91000 ТВт·ч. Перепад же температур между водами на глубине в сотни метров и водами на поверхности океана – огромный источник энергии, который оценивается в 20–40 тыс. ТВт, из них можно использовать только 4 ТВт [4; 5].

Преобразование энергии температурного градиента морской воды – это процесс, который использует теплую морскую воду для нагрева и испарения жидкости с низкой температурой кипения (например, аммиак), а холодную морскую воду, поступающую из недр океана, – для конденсации отработавшего в турбине газа (рис. 2).

Поэтому наиболее экономически эффективным решением должно стать улавливание и непосредственное использование диоксид углерода в качестве рабочего тела. Во-первых, хладагент CO₂ (R744) все шире используется в холодильных установках, не имеет цвета, запаха и тяжелее воздуха. Во-вторых, применение CO₂ чрезвычайно перспективно не только из-за простоты его получения, но и потому, что использование этого газа в различных агрегатных состояниях (газ, жидкость, твердое вещество) позволяет решать различные технологические задачи. При этом обезвоженный диоксид углерода (как газообразный, так и жидкий) не подвергает коррозии металлы [6].

В настоящее время группа исследователей корейского института передовых технологий (KAIST) предложили проект микромодульного реактора. В состав группы входят профессора Jeong Ik Lee, Yonghee Kim и Yong Hoon Jeong. Они предлагают инновационный проект реактора с циклом Брайтона на углекислом газе сверхкритических параметров (S-CO₂), который представляет собой газоохлаждаемый реактор электрической мощностью 12 МВт и длительным сроком службы (20 лет) без дозаправки. В качестве топлива используется нитрид урана низкого обогащения, а теплоносителем выступает S-CO₂. Использование S-CO₂ позволяет упростить систему преобразования тепловой энергии активной зоны в электроэнергию, выдаваемую потребителю. Кроме того, в проекте имеется пассивная система отвода тепла за счёт естественной циркуляции на случай аварийных ситуаций. Данный проект предлагается использовать в таких местах, как морские буровые платформы, химическое и

сталелитейное производство, или для энергоснабжения в удалённых районах – полярные регионы, пустыни, космическое пространство, и так далее [7].

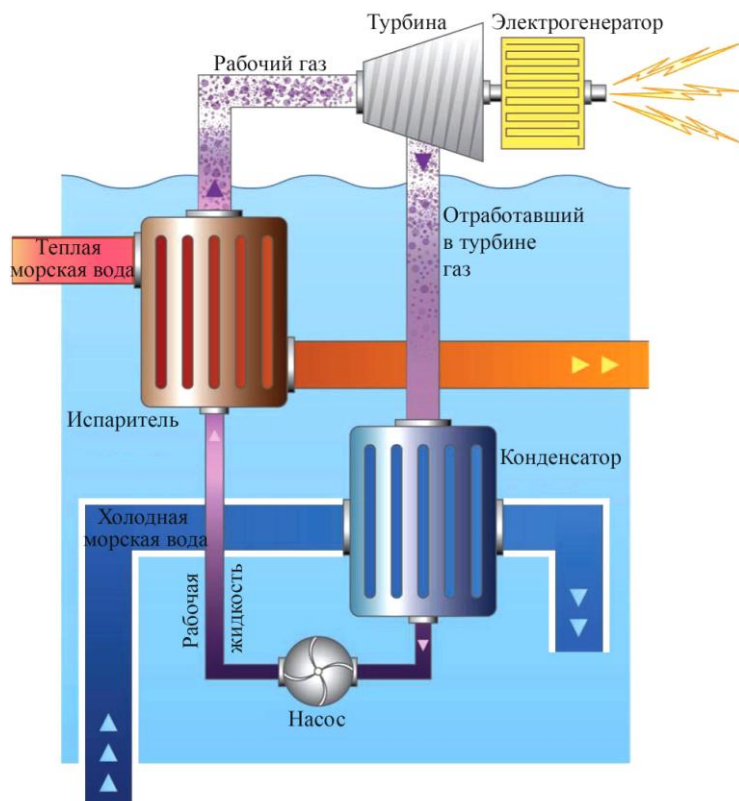


Рис. 2. Принципиальная схема градиент-температурной энергоустановки с использованием морской воды

Японские специалисты сосредоточили значительное внимание на тепловых насосах на основе CO_2 , а одна японская компания, *Mayekawa*, занимается в Северной Америке продажей в промышленных масштабах тепловых насосов на основе CO_2 в течение нескольких лет. *Mayekawa* предлагает три различных CO_2 тепловых насоса, водо-водяной тепловой насос *EcoCute*, тепловой насос воздух-вода *Unimo* и водо-воздушный тепловой насос *Sirocco*. К примеру, тепловые насосы *Mayekawa EcoCute* характеризуются коэффициентом полезного действия около 4,19 (табл. 2) и оснащаются электроприводными поршневыми компрессорами мощностью в 25 кВт. С точки зрения производительности, большим отличием тепловых насосов на основе CO_2 является то, что они могут производить гораздо более высокую выходную температуру [8].

Таблица 2

Показатели эффективности теплового насоса в зависимости от температуры нагрева воды

Показатель параметра, размерность	Хладагент CO_2
Теплопроизводительность / потребляемая мощность компрессора при нагреве воды с 15°C до 65°C, кВт	102,9 / 22,5 КПД – 4,57
Теплопроизводительность / потребляемая мощность компрессора при нагреве воды с 15°C до 85°C, кВт	104,9 / 25,0 КПД – 4,19
Теплопроизводительность / потребляемая мощность компрессора при нагреве воды с 15°C до 90°C, кВт	105,0 / 26,8 КПД – 3,91

Исследователи Фраунгоферовского Института безопасности окружающей среды и энергетических технологий (UMSICHT) в Оберхаузене придумали новое применение углекислому газу – процесс насыщения пластмассы сжатым CO_2 , который позволит расширить сферу применения пластмассы. При температуре 304,13 К и давлении 7,38 МПа CO_2 вступает в сверхкритическое состояние, которое дает газу растворимые свойства. В этом состоянии, он может быть введен в полимеры или предстать в роли вещества, в котором могут быть растворены краски, добавки, медицинские составы и другие субстанции. Новый процесс имеет огромный потенциал, так как углекислый газ не огнеопасен, не токсичен и не дорогой по сравнению с другими растворителями [9].

Фонд *X-Prize* уже в течение многих лет проводит соревнования, направленные на решение различных мировых проблем. Одним из последних проектов фонда стали соревнования по нахождению прорывной технологии использования углекислого газа. Представители *X-Prize* предполагают, что CO_2 можно использовать для создания прочных строительных материалов, одежды или для совершения различных открытий в медицине. Среди победителей соревнований должны оказаться те команды, которые смогут преобразовать как можно больше углекислого газа в различные продукты. Конкурс будет включать в себя два направления: первое будет сосредоточено на тестировании новой технологии с помощью угольных электростанций, а второе – на тестировании технологии с помощью природного газа [10].

Стоит отметить, что одним из направлений снижения выбросов CO_2 является развитие альтернативной энергетики на возобновляемых источниках энергии, которая имеет свои особенности. К примеру, в России развитие ветроэнергетики ограничивается непостоянством скорости ветра (от 3 до 15 м/с) в зависимости от погодных условий, дороговизной установки ветрогенераторов и их обслуживанием. Применение гелиоэлектростанций ограничивается интенсивностью солнечного излучения в зависимости от времени года, суток и метеоусловий, неэффективностью в ночное время суток. Наиболее востребованным для российских широт остается развитие геотермальной энергетики. Однако основным недостатком геотермальных электростанций (ГеоЭС) является низкий эффективный КПД станции (не превышает 20%) по сравнению с традиционными тепловыми электростанциями (40–42%).

Проводятся исследования и разработки использования сжиженного CO_2 в качестве низкокипящего рабочего тела (НРТ) в тепловом контуре органического цикла Ренкина (ОЦР). Особенно это актуально для различных вариантов утилизации сбросной низкопотенциальной теплоты (отработавшего в турбине пара или оборотной воды) тепловых электростанций для дополнительной выработки электроэнергии на собственные нужды станции [11].

Возможность применения CO_2 в качестве НРТ обусловлена его термодинамическими и теплофизическими свойствами (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что CO_2 характеризуется высокой плотностью и теплопроводностью газообразной фазы, имеет низкую кинематическую вязкость жидкой и газообразной фазы, характеризуется низкой теплотой парообразования.

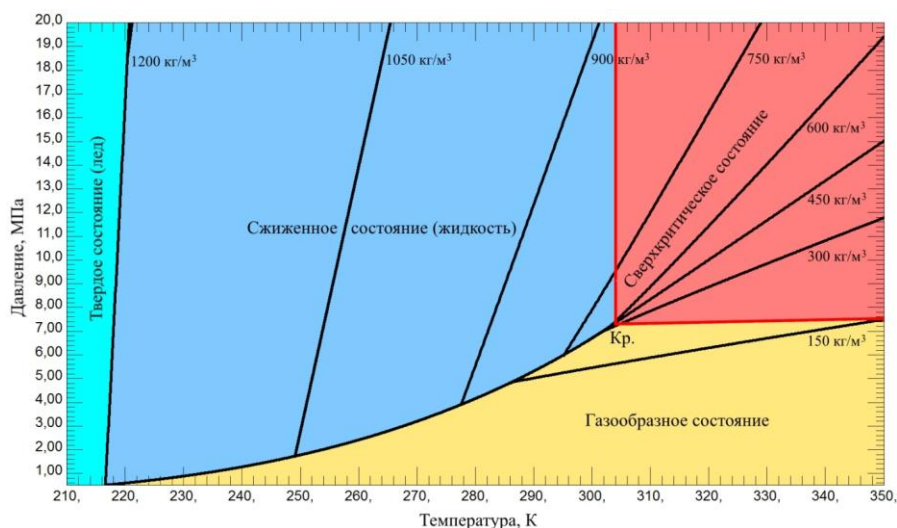
Температурный диапазон использования сжиженного газа CO_2 в качестве НРТ в тепловом контуре ОЦР ограничивается показателями критической температуры 304,13 К (31°C) и температурой в тройной точке 216,59 К (минус 56,56°C) (рис. 3). Поэтому использование сжиженного газа CO_2 в температурном диапазоне от 333,15 (60°C) до 223,15 К (минус 50°C) позволит обеспечить приемлемые давления контура циркуляции теплового двигателя и затраты на его сжатие [12].

Использование сжиженного CO_2 в качестве рабочего тела и охлаждающей жидкости при температуре от 290,15 до 304,13 К (от 17°C до 31°C) характеризуется повышенной изобарной теплоемкостью от 3 до 39 кДж/кг·К, что является соизмеримым показателем для воды H_2O при докритических параметрах (рис. 4).

Таблица 3

Основные термодинамические и теплофизические свойства CO_2 в сравнении с водой

Показатель параметра, размерность	CO_2	H_2O	Преимущества
Температура тройной точки, К	216,59	273,16	CO_2
Давление тройной точки, МПа	0,518	0,00061	CO_2
Плотность жидкой фазы, кг/м^3	896	1000	H_2O
Плотность газообразной (паровой) фазы, кг/м^3	114	0,0068	CO_2
Кинематическая вязкость жидкой фазы, $\text{см}^2/\text{с}$	0,001	0,015	CO_2
Кинематическая вязкость газообразной (паровой) фазы, $\text{см}^2/\text{с}$	0,0013	13,36	CO_2
Теплопроводность жидкой фазы, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	0,1043	0,57	H_2O
Теплопроводность газообразной (паровой) фазы, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	0,0216	0,0173	CO_2
Удельная теплота парообразования (фазового перехода), кДж/кг	215	2489	CO_2
Изобарная теплоемкость жидкой фазы при критических параметрах, $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	39,174	39,039	CO_2
Критическая температура, К	304,13	647,1	CO_2
Критическое давление, МПа	7,3773	22,064	CO_2
Критическая плотность, кг/м^3	467,6	322	CO_2
Максимальная температура нагрева, К	2000	2000	-

Рис. 3. Диаграмма равновесного фазового состояния CO_2 в координатах $P - T - \rho$ (давления – температуры – плотности)

На нефтехимических производствах тепловые потоки низкого потенциала с температурой меньше 90°C для жидких сред и температурой меньше 150°C для газообразных сред практически не находят применения, т.е. попросту выбрасываются в окружающую среду. Причем объем тепловых выбросов соизмерим с объемом потребления топливно-энергетических ресурсов и представляет собой термическое загрязнение окружающей среды. Примером может служить стадия газоразделения совместного производства этилена и пропилена, в котором имеется значительный резерв неиспользуемого низкопотенциального тепла оборотной воды (до 47°C и $240,2 \text{ кг/ч}$), отработанного пара низких параметров (до 143°C и $160,9 \text{ кг/ч}$), пропан-пропиленовой фракции (до 5°C и $1,5 \text{ кг/ч}$), метан-этиленовой фракции (до 15°C и $0,9 \text{ кг/ч}$). Наибольшую ценность для создания технологии утилизации с целью экономии топливно-энергетических

ресурсов имеют тепловые потоки оборотной воды и пара вследствие их высоких расходных и термодинамических характеристик [13].

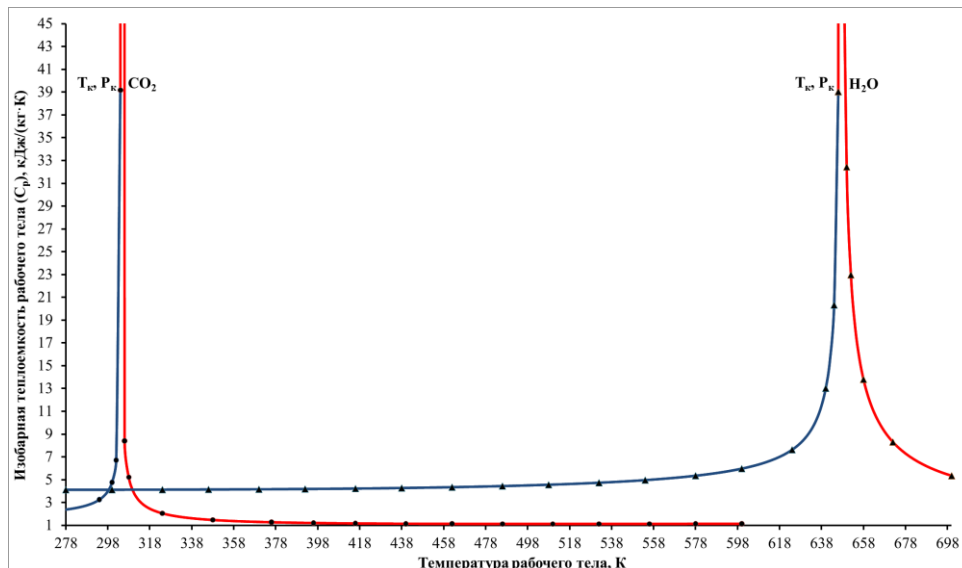


Рис. 4. Показатели изобарной теплоемкости рабочего тела при критических параметрах: —●— CO_2 ($T_k=304,13$ К; $P_k=7,3773$ МПа), —▲— H_2O ($T_k=647,1$ К; $P_k=22,064$ МПа)

Одним из возможных вариантов утилизации теплоты рассматриваемых потоков является установка теплового двигателя на CO_2 , в котором происходит утилизация (отбор) теплоты низких параметров для выработки электроэнергии (рис. 5). Включение установки теплового двигателя на CO_2 в схему производства позволит производить дополнительную электроэнергию для покрытия собственных нужд производства, что, в свою очередь, приведет к значительной экономии энергоресурсов [14].

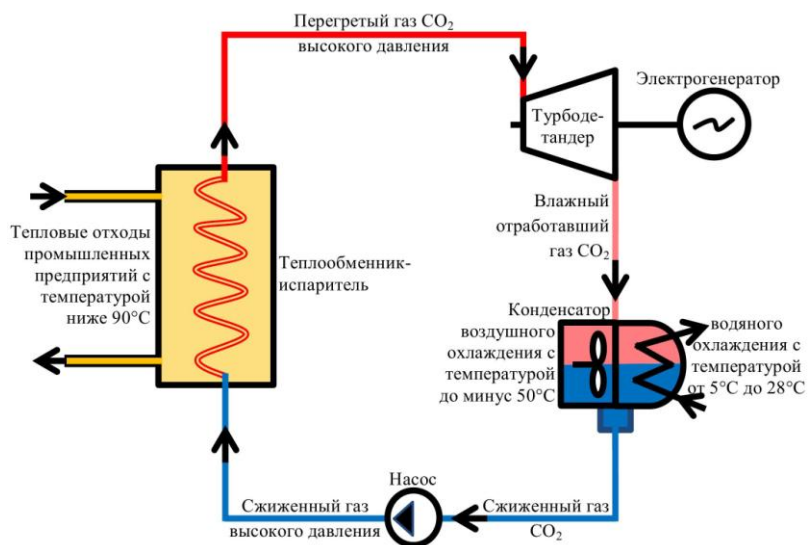


Рис. 5. Принципиальная схема теплового двигателя с замкнутым контуром циркуляции на CO_2 для утилизации тепловых отходов

Тепловой двигатель работает следующим образом (рис. 5 и 6). Сжиженный газ CO_2 сжимают в насосе (процесс $I-II$) до высокого давления, нагревают (процесс $II-III$) и испаряют (процесс $III-IV$) в теплообменнике-испарителе за счет подводимой теплоты промышленных отходов с температурой ниже 90°C . После чего, с температурой перегретого газа (процесс $IV-V$), его направляют на расширение (процесс $V-VI$) в турбодетандер теплового двигателя, который соединен с электрогенератором, затем расширенный газ с влажностью до 12% направляют на охлаждение (процесс $VI-I$) в теплообменник-конденсатор воздушного или водяного охлаждения, где в процессе охлаждения газа CO_2 ниже его температуры насыщения происходит интенсивное сжижение, после чего сжиженный газ направляют в насос и цикл повторяется.

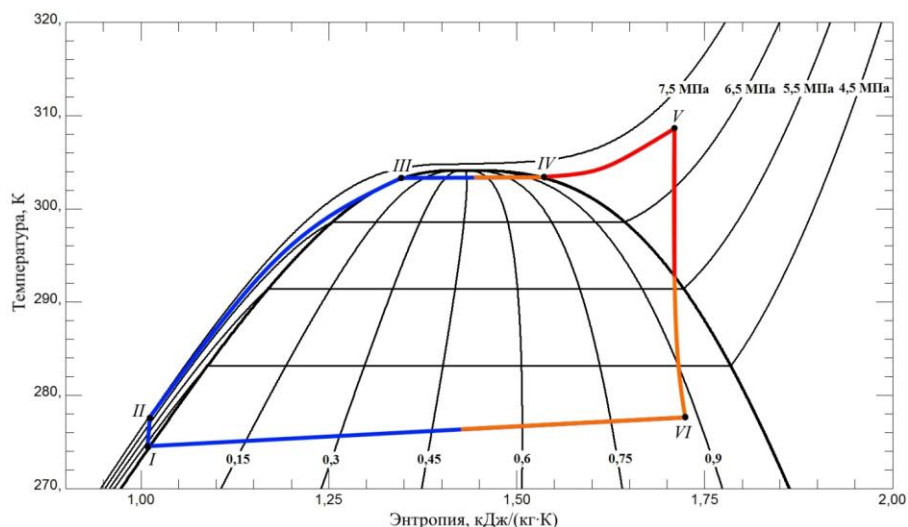


Рис. 6. Осуществление термодинамического цикла Ренкина в T - s диаграмме для углекислого газа CO_2

Также нужно отметить, что кривая линия насыщения углекислого газа (рис. 7) имеет отрицательный тангенс угла наклона $ds/dT < 0$ (полого убывает с ростом энтропии), который определяется как отношение приращения энтропии рабочего тела (ds) к приращению температуры рабочего тела (dT). Это позволяет осуществлять процесс расширения в турбодетандере углекислого газа до влажного состояния в области насыщенного газа, что характерно для традиционных паровых циклов.

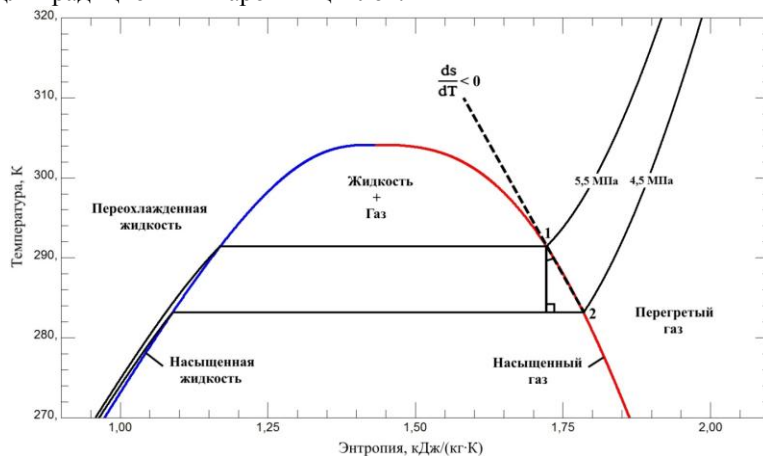


Рис. 7. T - s диаграмма для углекислого газа CO_2 «влажного» рабочего тела

Предлагаемый способ утилизации тепловых отходов обеспечивает дополнительную выработку электроэнергии при минимально допустимых температурных перепадах (разницах температур) между источником сбросной теплоты и окружающей среды, равных 39°C. Причем для выработки 1 кВт полезной электрической мощности с помощью теплового двигателя на CO₂ необходимо утилизировать в среднем около 160 кВт тепловой энергии. При этом эксергетический КПД данной установки может достигать 20% (табл. 4).

Таблица 4

Эксергетические КПД различных технических систем	
Наименование	Эксергетический КПД, %
Конденсационная электростанция	39–42
Парокомпрессионная холодильная установка	30–35
Абсорбционная водоаммиачная холодильная установка	12–15
Парокомпрессионный тепловой насос	35–40
Исследуемый тепловой двигатель на CO ₂	≤20

Поэтому новые решения в эффективном использовании CO₂ или преобразовании его в другие виды продуктов должны способствовать снижению эмиссии парниковых газов в окружающую среду.

Выводы

1. Помимо «захоронительных» технологий утилизации CO₂ возможны и иные способы его применения.

2. Улавливание CO₂ из дымовых газов промышленных предприятий и непосредственное его использование на самих предприятиях в качестве рабочего тела для различных тепловых машин является одним из экономически выгодных решений для снижения выбросов CO₂ в атмосферу и повышения топливной экономичности самих предприятий.

3. Уникальность термодинамических и теплофизических свойств CO₂ позволяет использовать его в различных температурных режимах и термодинамических циклах (Ренкина, Брайтона, Лоренца), что в будущем должно обеспечить большие объемы использования CO₂ в контурах циркуляции различных технологических решений.

Литература

1. Кокорин А.О. Меры по снижению в России выбросов парниковых газов и приоритеты работы российских неправительственных организаций. Москва, WWF России, 2012. 34 с.
2. Экологическая эффективность технологии газификации угля на примере Красноярской агломерации. Режим доступа: <http://modernproblems.org.ru/ecology/24-hlebopros8.html>.
3. Технология извлечения углекислого газа при утилизации дымовых газов. Режим доступа: <http://www.neroaera.com/?p=89>.
4. Энергия океана: волновая электростанция Oceanlinx. Режим доступа: <http://aenergy.ru/1981>.
5. Экологические проблемы энергетического обеспечения человечества. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/ecol/ecol05.htm>.
6. Гафуров А.М. Утилизация сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭС в зимний период времени для дополнительной выработки электроэнергии // Энергетика Татарстана. 2014. № 2 (34). С. 21–25.
7. Supercritical CO₂-cooled micro modular reactor. Режим доступа: <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160309210043.htm>.
8. Alex Wilson. A Heat Pump Using Carbon Dioxide as the Refrigerant, Building Green, 2013. Режим доступа: http://www.polel.ru/all_news/jarn/heat-pump-co2/.
9. Impregnating plastics with carbon dioxide. Fraunhofer Press. Research News 01-2011. Topic 2. Режим доступа: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2011/january/impregnating-plastics.html>.

10. Фонд X-Prize найдет новое применение углекислому газу. Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/hi-tech/fond-x-prize-naydet-novoe>.

11. Гафуров А.М. Способ преобразования сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭС в работу низкотемпературного теплового двигателя с замкнутым контуром // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. № 3 (31). С. 73–78.

12. Гафуров А.М., Гатина Р.З., Гафуров Н.М. Температурный диапазон использования сжиженного газа CO₂ в качестве низкокипящего рабочего тела // Теория и практика современной науки. 2016. № 9 (15). С. 88–91.

13. Утилизация вторичных энергоресурсов в нефтехимической промышленности. Режим доступа: http://www.ateffekt.ru/publ/teploobmenniki/utilizacija_vtorichnykh_energoresurov_v_neftekhimicheskoy_promyshlennosti/6-1-0-95.

14. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гафуров Н.М., Гатина Р.З. Способ утилизации тепловых вторичных энергоресурсов промышленных предприятий для выработки электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11–12. С. 37–43.

Авторы публикации

Гафуров Айрат Маратович – инженер I категории отдела «Управление научно-исследовательской работы» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: progress150987@rambler.ru.

Осипов Борис Михайлович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: obm0099@yandex.ru.

Гатина Резеда Зуфаровна – студентка 4 курса, кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Гафуров Наиль Маратович – студент 4 курса, кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: hankmprom@mail.ru.

References

1. Kokorin A.O. Measures for decrease in Russia emissions of greenhouse gases and priorities of work of the Russian non-governmental organizations. Moscow, WWF of Russia, 2012. 34 p.

2. Ecological efficiency of technology of gasification of coal on the example of Krasnoyarsk agglomeration. Access mode: <http://modernproblems.org.ru/ecology/24-hlebopros8.html>.

3. Technology of extraction of carbon dioxide at utilization of combustion gases. Access mode: <http://www.neroaera.com/?p=89>.

4. Energy of the ocean: wave power plant Oceanlinx. Access mode: <http://aenergy.ru/1981>.

5. Environmental problems of power providing mankind. Access mode: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/ecol/ecol05.htm>.

6. Gafurov A.M. Utilization of waste low-potential warmth of thermal power plant during the winter period of time for additional power generation // Power industry of Tatarstan. 2014. No. 2 (34). Pp. 21–25.

7. Supercritical CO₂-cooled micro modular reactor. Access mode: <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160309210043.htm>.

8. Alex Wilson. A Heat Pump Using Carbon Dioxide as the Refrigerant // Building Green, 2013. Access mode: http://www.polel.ru/all_news/jarn/heat-pump-co2/.

9. Impregnating plastics with carbon dioxide. Fraunhofer Press. - Research News 01-2011-Topic 2. Access mode: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2011/january/impregnating-plastics.html>.

10. The fund X-Prize will find new application to carbon dioxide. Access mode: <https://naked-science.ru/article/hi-tech/fond-x-prize-naydet-novoe>.

11. Gafurov A.M. A way of transformation of waste low-potential warmth of thermal power plant to operation of the low-temperature heat engine with the closed contour // Bulletin of the Kazan state power university. 2016. No. 3 (31). Pp 73-78.

12. Gafurov A.M., Gatina R.Z., Gafurov N.M. Temperature range of use of the liquefied CO₂ gas as the low-boiling working body // Theory and practice of modern science. 2016. No. 9 (15). Pp. 88-91.

13. Utilization of secondary energy resources in the petrochemical industry. Access mode: http://www.ateffekt.ru/publ/teploobmenniki/utilizaciya_vtorichnykh_energoresursov_v_neftekhimicheskoy_promyshlennosti/6-1-0-95.

14. Gafurov A.M., Osipov B.M., Gafurov N.M., Gatina R.Z. A way of utilization of thermal secondary energy resources of the industrial enterprises for power generation // News of higher educational institutions. Power problems. 2016. No. 11-12. Pp. 37-43.

Authors of the publication

Airat M. Gafurov – engineer of the I category of department “Management of research work” Kazan state power engineering university (KSPEU). Email: progress150987@rambler.ru.

Boris M. Osipov – cand. tech. sci., professor department “Power engineering” Kazan state power engineering university (KSPEU). Email: obm0099@yandex.ru.

Reseda Z. Gatina – 4th year student, department “Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds” Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Nail M. Gafurov – 4th year student, department “Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds” Kazan National Research Technological University (KNRTU). Email: hankmpro@mail.ru.

Поступила в редакцию

28 мая 2017 г.

УДК 621.313

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ. СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

С.М. Коробейников¹, М.Н. Лютикова²

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

²Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы, г. Ноябрьск, Россия

Резюме: Статья посвящена рассмотрению вопроса о влиянии воды на главную изоляцию высоковольтного оборудования и его технического состояния в целом. Рассмотрены современные методы определения влагосодержания изоляционных жидкостей, используемые в лабораториях энергетических предприятий. Приведены их возможности и ограничения. Внимание акцентировано на проблемах метрологического обеспечения, технологии выполнения и стандартизации методик. Приведены перспективные методы определения влаги. Дана оценка значимости получения адекватных результатов анализов с целью своевременного проведения технического обслуживания высоковольтного оборудования и недопущения выхода его из строя.

Ключевые слова: твердая изоляция, жидкий диэлектрик, пробой, растворимость воды, мешающие компоненты.

LIQUID INSULATING MATERIALS MOISTURE CONTENT CONTROL METHODS. CONDITION AND PROBLEMS

S.M. Korobeynikov¹, M.N. Lyutikova²

¹Nobosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²Federal Grid Company of Unified Energy System, Noyabrsk, Russia

Abstract: The article is dedicated to the issue of water influence on the main insulation of high voltage equipment and its technical condition in general. The article reviews modern methods of definition of moisture content of insulating liquids used in laboratories of public utilities. Their possibilities and limitations are provided. The attention is drawn to problems of metrological provision, performance technology and methods standardization. Prospective methods of moisture definition are provided. The article appraises the importance of relevant analysis results recovery in order to timely execute technical maintenance of high voltage equipment and its failure prevention.

Keywords: solid insulation, dielectric liquid, hole, water solubility, interferences.

Введение

Согласно статистическим данным более 50% отказов силовых трансформаторов связано с нарушением электрической прочности изоляции. Основной причиной ухудшения состояния твердой изоляции является ее увлажнение, вследствие которого снижается механическая прочность, ускоряются термохимические процессы как в главной изоляции, так и в жидкой изолирующей среде. Твердая целлюлозная изоляция, в силу своего молекулярного строения и волокнистой структуры, способна удерживать до 98–99% воды от общего количества, содержащегося в системе «жидкий диэлектрик-целлюлоза». Источником

появления воды могут быть как нормальные процессы термохимического старения диэлектриков, так и поступление воды извне, например, в случае нарушения герметичной пленочной или азотной защиты оборудования.

В настоящее время в качестве жидких диэлектриков в высоковольтном электрооборудовании применяют разные марки трансформаторных масел: ГК, ВГ, ТКп, Т-750, *Nytro 11 GX*, *Nytro 10XN*, *Tehmol 2000*. За рубежом все чаще используют кремнийорганические (силиконовые) жидкости (Канада, США, Япония) и сложные эфиры *Midel 7131*, *Midel eN*, *Envirotemp FR3*, *Biotemp* (Европа) [1–4]. Технология производства диэлектриков различна, а значит, сильно отличается их структурно-групповой состав и спектр примесных соединений, что сказывается на их способности растворять воду. В силу гидрофобности молекул углеводородов минеральные масла характеризуются низкой растворимостью воды (порядка 30–60 ppm¹) [5]. Силиконовые жидкости (150–300 ppm) и эфиры (300–2600 ppm) имеют более высокие пределы насыщения при температуре 20–23°C [6]. Предельная растворимость воды в диэлектриках является также функцией от температуры системы «вода-изоляционная жидкость-целлюлоза», т.е. растворимость увеличивается экспоненциально с повышением температуры. Надо заметить, что растворенная вода образует в органических диэлектрических жидкостях истинный раствор и практически не оказывает влияния на изменение изоляционных характеристик, а именно снижение электрической прочности жидкого диэлектрика. Но при понижении температуры в первую очередь образуется вода в виде конденсата, которая затем переходит в эмульсионную воду, повышающую диэлектрические потери жидкости [7]. В минеральных маслах, особенно находящихся в эксплуатации, наряду с растворенной и эмульсионной формами существует некоторое количество связанной воды. Такая форма образуется за счёт взаимодействия ее молекул с ионными и полярными продуктами окислительного процесса масла (серо- и азотсодержащими компонентами, металлоорганическими соединениями, солями нафтеновых кислот, смолистыми веществами и др.). Крайне нежелательная связанная вода по своей электрохимической природе является электролитом и заметно снижает электрофизические свойства жидкого диэлектрика, такие как электрическая прочность и тангенс угла диэлектрических потерь [8]. Все формы воды («связанная – растворенная – эмульсионная») в жидкости постоянно находятся в состоянии динамического равновесия, и одна форма воды может переходить в другую при изменении температурного фактора. Особенно опасна ситуация, когда происходит резкое охлаждение изоляционной среды, например, при снижении нагрузки или выводе оборудования из эксплуатации, которая приводит к появлению эмульсионной воды из растворенной формы. В этом случае молекулы эмульсионной воды диффундируют в сторону целлюлозы, находящейся в постоянном контакте с увлажненной изоляционной жидкостью. Адсорбированная на поверхности твердой изоляции вода представляет большую угрозу при вводе высоковольтного оборудования в работу, т.к. существует вероятность возникновения пробоя, особенно при низких температурах изоляции обмоток. Такие опасные ситуации, конечно, можно и нужно предотвращать путем проведения своевременных технических мероприятий, воздействующих на главную изоляцию через жидкий диэлектрик. К первоочередному мероприятию относится осуществление периодического контроля строго нормируемой концентрации воды в изоляционной жидкости^{2,3;4;5}. При этом очень важно при контроле влагосодержания жидких диэлектриков получить достоверный результат, который зависит не только от корректного

¹ ppm – одна миллионная часть (1 ppm=10⁻⁶=0,0001%=1 г/т)

² РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Под общей редакцией Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. 6-е изд. М.: НИЦ ЭНАС, 1998. 256 с.

³ IEC 60422: Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance. Edition 4.0. Geneva, IEC Central Office. 2013. 45 с.

⁴ IEC 60836: Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes. Edition 3.0. IEC Central Office. 2015. 12 с.

⁵ ASTM Standart D6871: Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus. ASTM International. 2008.

отбора пробы, но и от выбора метода физико-химического анализа в лабораторных условиях, позволяющего узнавать количество связанной, растворенной и/или эмульсионной форм воды.

Обзор методов контроля концентрации воды в жидкой изоляции высоковольтного оборудования

К настоящему времени известны стандартизованные и нестандартизованные методики определения воды в изоляционных жидкостях (минеральных маслах, силиконовых жидкостях, синтетических и натуральных эфирах). Методики количественного измерения основаны на химических, электрохимических, хроматографических и спектральных методах анализа (табл. 1).

Таблица 1

Методы определения воды в изоляционных жидкостях

Нормативный документ	Принцип метода	Анализируемые продукты	Форма определяемой воды
Качественные методы обнаружения			
ГОСТ 1547 ⁶	Визуализация	Минеральные масла	Растворенная, эмульсионная
Химические методы			
ГОСТ 7822-75 ⁷	Измерение объема газа, выделившегося при взаимодействии веществ	Минеральные масла	Растворенная
Электрохимические методы			
ГОСТ Р МЭК 60814-2013 ⁸	Кулонометрическое титрование	Минеральные масла	Общая (связанная, растворенная, эмульсионная)
ASTM Standart D1533 ⁹		Силиконовые жидкости Натуральные эфиры Синтетические эфиры	
Не стандартизован	Кулонометрия с электролизом на чувствительном элементе	Минеральные масла	Растворенная
Хроматографические методы (газовая хроматография – ГХ)			
РД 34.43.107-95 ¹⁰	ГХ с прямым вводом пробы в испаритель	Минеральные масла	Общая (связанная, растворенная, эмульсионная)
	ГХ без вакуумирования		Растворенная
	Равновесное извлечение растворенной воды из масла		Растворенная
Методика НПО «Электрум» [9]	ГХ с вводом пробы экстракта в испаритель (ацетонитрил с извлеченной влагой)	Минеральные масла	Растворенная, эмульсионная
Спектральные методы			
Не стандартизован	ИК-спектроскопия	Минеральные масла Силиконовые жидкости Натуральные эфиры Синтетические эфиры	Растворенная, связанная, эмульсионная
Не стандартизован	Люминесцентная спектроскопия		
Не стандартизован	ЯМР-спектроскопия		
Не стандартизован	ЭПР-спектроскопия		

⁶ ГОСТ 1547-84. Масла и смазки. Методы определение наличия воды. М.: Изд-во стандартов, 1984. 3 с.

⁷ ГОСТ 7822-75. Масла нефтяные. Метод определения растворенной воды. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.

⁸ ГОСТ Р МЭК 60814-2013. Жидкости изоляционные. Бумага и прессованный картон, пропитанные маслом. Определение содержания воды автоматическим кулонометрическим титрованием по Карлу Фишеру. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

⁹ ASTM Standart D1533: Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration. ASTM International. 2012.

¹⁰ РД 34.43.107-95 Методические указания по определению содержания воды и воздуха в трансформаторном масле. М. АО ВНИИЭ, 1996. 42 с.

В табл. 2 приведены метрологические характеристики некоторых методик анализа воды.

Таблица 2

Сравнительная характеристика некоторых методик количественного определения воды в трансформаторных маслах

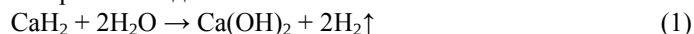
Параметры	Методики анализа			
	ГОСТ 7822-75 ⁷	ГОСТ Р МЭК 60814-2013 ⁸	РД 34.43.107-95 ¹⁰ (прямой ввод пробы в испаритель)	Влагомер ВТМ-МК ¹¹
Объем вводимой пробы, мл	150–180	0,2–10	0,025–0,100	2
Диапазон определяемых концентраций, г/т	10–100	2-100	2–200	2,5–50
Предел обнаружения, г/т	10	2	2	2,5
Время анализа (без подготовки прибора), мин	45–60	2-5	10	15
Допускаемая сходимость метода	1,5–20 мг/дм ³	10%	10%	2,5 г/т
Допускаемая воспроизводимость метода	–	15%	–	–
Примечание: «–» — показатель в нормативном документе не указан				

Качественное определение воды по ГОСТ 1547–84⁶ в минеральных маслах основано на быстром нагревании пробирки с пробой диэлектрика путем погружения ее в масляную баню, нагретую до 130°C. При резком нагреве над поверхностью масла происходит парообразование и стенки пробирки (выше уровня масла) мутнеют от конденсирующихся паров воды. О наличии влаги судят по вспениванию и треску пробы. Такое определение можно проводить при условии отсутствия требований предприятий-изготовителей по количественному содержанию влаги в продукте, что происходит крайне редко. Поскольку влага в масле представляет потенциальную угрозу возникновения пробоя, ее количество строго нормируется, поэтому качественный метод практически не используется при испытании трансформаторных масел.

К количественным методам анализа воды в жидких диэлектриках относятся гидрид-кальциевый метод (ГОСТ 7822–75⁷), метод кулонометрического титрования по Карлу Фишеру (IEC 60814⁸, ASTM D1533⁹), хроматографические методы с разными способами ввода пробы масла (РД 34.43.107-95¹⁰). На конечный результат определения влагосодержания влияют не только методы, но и формы связи воды с молекулами жидкого диэлектрика.

К химическим методам относится *гидрид-кальциевый метод определения растворенной воды*. Метод был стандартизован в 1975 году в ГОСТ 7822⁷ и до недавнего времени широко использовался в лабораториях энергетических компаний. Следует отметить, что установленные нормативные значения по влагосодержанию минеральных масел в России основаны на результатах измерения гидрид-кальциевым методом. Метод позволяет определять массовую долю растворенной воды в свежих, регенерированных и эксплуатационных маслах, не содержащих эмульсионную воду.

В основе метода – реакция взаимодействия гидрида кальция с водой (1), в результате которой выделяется водород. По объему выделившегося водорода, используя ряд формул, рассчитывают массовую долю растворенной воды в масле:



¹¹ Руководство по эксплуатации влагомера трансформаторного масла ВТМ-МК 5К2.844.136 РЭ, 2007. 29 с.

Из всех возможных соединений (карбиды, азиды щелочных металлов или вещества с металлической связью) гидрид кальция выбран из соображения наиболее эффективного взаимодействия: при реагировании с 1 молем воды образуется 1 моль водорода, тогда как с остальными специфическими веществами стехиометрия реакции – 2 моль к 1 моль газа.

Прибором для измерения влагосодержания электроизоляционных масел гидрид-кальциевым методом является достаточно хрупкий и громоздкий прибор типа ПВН. На рис. 1 показана схема прибора. Подробное описание конструкции прибора приведено в ГОСТ 7822–75⁷. В настоящее время прибор ПВН предлагается в собранном виде. Однако это не устраняет недостатки, к которым следует отнести продолжительное время подготовки прибора к измерению, включая проверку на герметичность, установку равновесия воздуха по объему, газонасыщение дегазированного масла. С учетом сказанного время испытания одной пробы масла (два последовательных измерения) составляет около 4 часов.

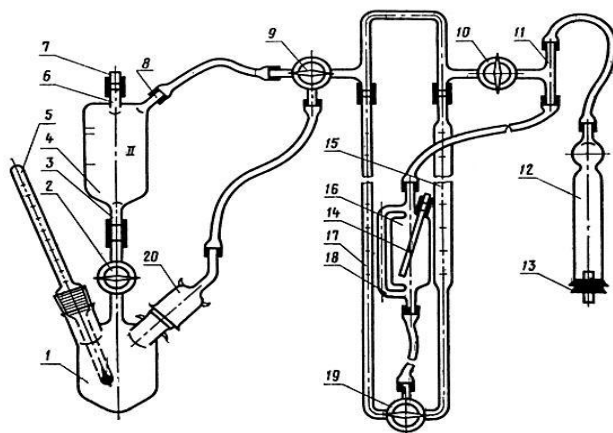


Рис. 1. Прибор для определения растворенной воды в минеральных маслах по гидрид-кальциевому методу

Требуемый объем пробы масла для проведения двух последовательных измерений составляет не менее 350 мл. Один опыт (без учета сборки устройства ПВН, проверки герметичности и т.д.) продолжается 45 мин. В процессе опыта каждые 5 минут фиксируются параметры (время отсчета t , мин; температура внутри реакционного сосуда прибора ПВН t , °C; атмосферное давление p , МПа или мм рт. ст.; количество выделившегося газа водорода V_t , см³; поправка на изменение объема газа в зависимости от температуры a , см³; объем выделившегося водорода с учетом поправки v , см³; отношение t/v , мин/см³). На основе полученных результатов, с учетом поправки на температуру испытания, строят график и проводят вычисления влагосодержания в масле.

Массовую долю растворенной влаги в масле рассчитывают по двум последовательным определениям, расхождение между которыми не должно превышать значений от 1,5 до 20 мг/дм³ в зависимости от диапазона определяемых концентраций. Так, например, для диапазона от 20 до 50 мг/дм³ допустимое расхождение не более 6 мг/дм³.

На практике очень сложно добиться такой сходимости ввиду многих причин. Ярким примером является нестабильность работы прибора ПВН вследствие колебания давления и температуры при открывании или закрывании двери помещения во время анализа. Для дегазированных масел во время реакции бывают случаи, когда водород не выделяется, а поглощается маслом, причем общее давление водорода над маслом не только не повышается, но и понижается. Недостатком метода также является активность гидрида кальция при реакции с кислотами, образующимися в масле при окислении в процессе длительной эксплуатации. Все это может приводить к недостоверности результатов анализа:

занижению или завышению концентрации воды в электроизоляционных жидкостях как свежих, так и находящихся в эксплуатации. Низкий предел чувствительности метода (10 г/т) делает его неприемлемым в условиях эксплуатации высоковольтного оборудования с герметичным исполнением.

Несмотря на небольшое количество применяемых реактивов, гидрид-кальциевый метод является чрезвычайно трудоемким определением влаги в минеральных маслах и в современной лабораторной практике почти не используется.

В настоящее время наиболее распространенным в мире и в нашей стране является метод определения содержания воды реактивом Карла Фишера. Метод осуществлен в приборах ряда фирм (“Metrohm” и “Mittler Toledo”, Switzerland; “Mitsubishi Chemical Analytech Co Ltd.”, Japan; ООО «КПФ «Промикс», Чешская республика; ООО «Экохим» и ООО «Эконикс-Эксперт», Россия) в виде автоматического кулонометрического титратора и стандартизован в России в ГОСТ Р МЭК 60814–2013⁸, в Европейских странах – IEC 60814 и США – ASTM D1533⁹.

В основе анализа лежит реакция взаимодействия воды с йодом и двуокисью серы в присутствии пиридина в метаноле:



Генерация йода происходит электрохимически в процессе анодного окисления на генерирующем электроде:



До тех пор, пока в анолите присутствует вода, генерированный йод вступает в реакцию по уравнениям (2) и (3). Мерой содержания воды является расход тока. На генерирующий электрод подается электричество в таком количестве, которое необходимо для образования йода, вступающего в реакцию с определяемой водой. Расчет необходимого количества электричества основан на втором законе электролиза Фарадея, который гласит: «для данного количества электрического заряда масса химического элемента, осаждённого на электроде, прямо пропорциональна эквивалентной массе элемента». Математический вид закона выглядит следующим образом:

$$m = \left(\frac{Q}{F}\right) \cdot \left(\frac{M}{z}\right), \quad (1.1)$$

где m – масса осажденного на электроде вещества, мг или мкг; Q – полный электрический заряд, прошедший через вещество, Кл или мКл; F – постоянная Фарадея (96 485,33(83) Кл/моль); M – молярная масса вещества, а в нашем случае йода, г/моль; z – валентное число ионов вещества (число электронов на один ион).

Допустим, в пробе диэлектрика масса воды составляет 1 мг, что соответствует количеству моль $n(\text{H}_2\text{O}) = 1:18 = 0,055(55) \cdot 10^{-3}$, где 18 г/моль – относительная молекулярная масса молекулы воды. В реакции I_2 и H_2O реагируют друг с другом в соотношении 1:1. Поэтому $n(\text{H}_2\text{O}) = n(\text{I}_2) = 0,055(55) \cdot 10^{-3}$ моль. Преобразуя формулу 1.1, получим:

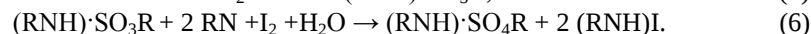
$$Q = \left(\frac{m}{M}\right) \cdot F \cdot z = n \cdot F \cdot z. \quad (1.2)$$

Из реакции (4) видно, что число электронов на один ион йода $z = 2$. Подставляя в формулу (1.2) все известные величины, получаем, что для генерации йода, участвующего в реакции (2) в эквивалентном количестве с 1 мл воды в анолите, требуется электрический заряд величиной 10,72 Кл.

После того, как вся вода прореагирует, в анодной области образуется небольшой избыток йода, который регистрируется поляризованным измерительным электродом, отключающим при этом ток, подаваемый на электроды электролизера. Процесс генерации йода останавливается.

Пиридин и метанол являются токсичными соединениями. В стандарте ГОСТ Р МЭК 60814-2013⁸ отмечено, что при титровании некоторых изоляционных жидкостей

допускается использовать другие комбинации растворов «основание–спирт». Однако только с метанолом реакция является строго стехиометрической, кроме того метанол не только действует как растворитель, но и участвует непосредственно в самой реакции. При этом процентное содержание метанола в растворителе должно быть не менее 20%. Использование, например, этанола, 2-пропанола, метоксиэтанола, диэтиленгликоля, моноэтилового эфира вместо метанола приводит к медленному протеканию реакций. Пиридин не принимает непосредственное участие в реакции, т.е. действует только как буферный агент, поэтому его можно заменить на менее токсичный имидазол без потери скорости и точности титрования. В этом случае реакции с имидазолом ($C_3H_4N_2 = RN$) протекают следующим образом:



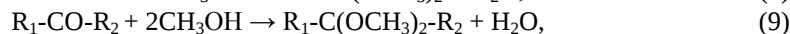
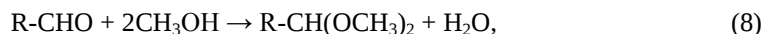
Общее химическое уравнение:



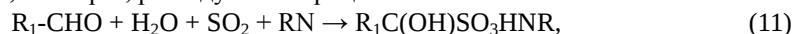
Но, несмотря на безвредность имидазола, реагенты Карла Фишера по-прежнему содержат пиридин, в силу наименьшей стоимости.

В процессе кулонометрического определения воды в жидких диэлектриках реактивом Фишера параллельно могут проходить побочные реакции, которые искажают результаты анализа [10].

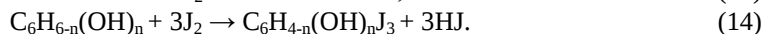
Метанол в составе реактива Фишера может вступать в реакции с альдегидами (8), кетонами (9), карбоновыми кислотами (10), которые присутствуют в окисленных изоляционных маслах. Данные реакции приводят к завышению результатов анализа воды в изоляционных жидкостях.



Другая побочная реакция – взаимодействие дисульфида с альдегидами и кетонами, в результате которых вода, наоборот, расходуется в процессе анализа:



К завышенным концентрациям влагосодержания могут приводить реакции реактива Фишера с меркаптанами (13), фенолами (14) в результате более высокого потребления йода при титровании изоляционных жидкостей, особенно окисленного минерального масла:



В общем случае мешающие соединения приходится либо делать инертными к реактиву Фишера (добавлением определенных реагентов), либо количественно определять их в отдельном опыте и в найденное содержание воды вносить соответствующую стехиометрическую поправку. Так, например, карбонильные соединения (альдегиды и кетоны), в различной степени взаимодействующие с реактивом Фишера, должны быть переведены в циангидрины до определения воды титрованием. Меркаптаны, стехиометрически взаимодействующие с реактивом Фишера, следует перед определением воды перевести в сульфиды. Такие процедуры на практике, как добавление того или иного реактива, который предотвращает реакцию, мешающую проведению анализа, или определение мешающих компонентов в отдельном опыте затруднено ввиду сложного химического состава окисленного минерального масла. Кроме того, эти процессы очень трудоемкие и требуют большого количества разнообразных реактивов.

Из уравнений (2) и (3) следует, что максимальное количество воды, вступающее в реакцию с 1 молем J_2 реактива Фишера, равно 1 молю. Такое теоретическое соотношение редко достигается вследствие побочных реакций. Эквивалентность свежеприготовленного реактива с учетом поправок на содержание воды в нем составляет около 80% от

теоретического. В течение месяца его активность снижается почти до 50%, а через 3 мес. она падает до 40% теоретического значения [10; 11].

Поскольку реактив Фишера способен разрушать химически связанную воду, его можно считать методом определения общего влагосодержания, позволяющим определять все формы воды (связанную, растворенную, эмульсионную), но при условии отсутствия частиц углерода. Последние, по данным авторов [5], легко связывают порядка 30–40% воды из масла, что ставит под сомнение получение достоверных концентраций воды в жидком диэлектрике.

В целом метод определения влаги реактивом Карла Фишера применим для изоляционных жидкостей с содержанием воды от 2 до 100 мг/кг (г/т или ppm), с вязкостью менее 100 мм²/с при температуре 40°C. Чувствительность метода – 2 г/т воды в диэлектрике (по массе), что превосходит чувствительность гидрид-кальциевого метода. Расхождение между параллельными определениями не более ± 10%. Аппаратурное оформление метода Фишера более сложное, чем гидрид-кальциевого. Как правило, автоматический анализатор состоит из микропроцессорного управляющего блока, благодаря которому титрование выполняется автоматически. Ввод требуемых параметров измерений происходит с помощью встроенной или выносной клавиатуры. Важным составным элементом любого автоматического анализатора является титровальная ячейка, в крышке которой встроены генерирующий и индикаторный электроды (рис. 2). Анодное отделение ячейки заливается анолитом или анодным раствором, содержащим диоксид серы, пиридин или имидазол, йодид, метанол или другие подходящие растворители. Катодное отделение содержит католит (катодный раствор) – реагент, который обеспечивает завершение электрохимической реакции окисления, протекающей в анодном отделении. Состав католита обычно аналогичен анодному раствору или могут использоваться другие модифицированные растворители. В настоящее время электролиты Фишера предлагаются в готовом виде.

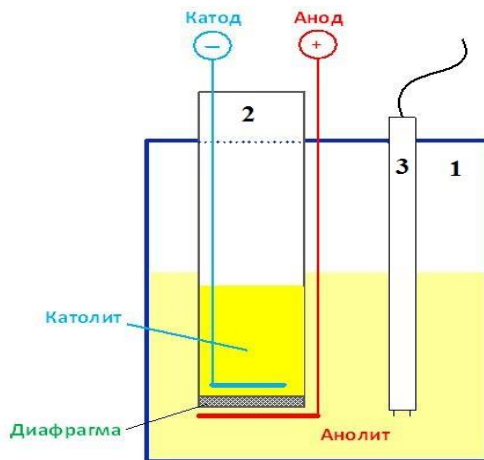


Рис. 2. Кулонометрическая ячейка автоматического титратора:

- 1 – титровальная (кулонометрическая) ячейка; 2 – генерирующий электрод с диафрагмой;
3 – индикаторный электрод; анолит – анодный раствор; католит – катодный раствор

Учитывая чувствительность реактива Фишера к влаге, при его использовании тщательно следят за состоянием осушителя, титровальной ячейки и электродов. В процессе титрования образующаяся метилсульфоновая кислота $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ может достигать катод в анодном отсеке, где восстанавливается до сульфидного соединения¹². Чтобы избежать нежелательных реакций, катодный и анодный раствор необходимо менять один раз в две недели. Перед заменой растворов проводится целый комплекс по очистке ячейки и электродов, особенно

¹² Инструкция по эксплуатации автоматического титратора 831 KF Coulometer. 102 с.

генерирующего электрода с диафрагмой, поскольку последняя обводняется уже через несколько измерений. В противном случае полученные результаты нельзя считать достоверными. С момента использования свежего реактива проводят регулярный контроль по стандартным растворам воды в метаноле с концентрацией 0,1 и 1,0 мг/г. Такие растворы можно приобрести готовые (в ампулах) или приготовить в лаборатории самостоятельно. Проведение процедур, связанных с калибровкой анализатора, требует от персонала определенного опыта.

Метод Фишера при тщательной работе обладает высокой чувствительностью и точностью. Вместе с тем, он отличается большой трудоемкостью, требует специальной подготовки персонала химических лабораторий и соблюдения всех условий работы с вредными и ядовитыми веществами.

Таким образом, при выборе данного метода для количественного определения влагосодержания в изоляционных маслах нужно учитывать следующие недостатки:

- активность компонентов реактива Фишера, которые реагируют не только с водой, но и с продуктами окисления масла (карбонильные, карбоксильные и фенольные соединения), образующимися в процессе его старения, что может приводить к ошибкам при определении влагосодержания в эксплуатационных маслах;
- реактив Фишера является достаточно сложным соединением и, к тому же, с коротким сроком эффективности (требуется замена анолита и католита, залитых в кулонометрическую ячейку, каждые две недели);
- частая и продолжительная регенерация кулонометрической ячейки, осушителя, электродов;
- высокая стоимость анализатора;
- комплектующие и расходные материалы для реализации метода достаточно дорогие.

Многие недостатки, присущие автоматическому кулонометрическому титрованию воды реактивом Фишера, отсутствуют в *кулонометрическом методе определения влажности изоляционных жидкостей*. Данный метод заключается в непрерывном поглощении влаги из пробы жидкого диэлектрика сухим газом-носителем, проходящим через кулонометрический чувствительный элемент, и непрерывном электролизе всей поглощаемой влаги. Продукты электролитического разложения влаги – газообразный кислород и водород – выносятся из чувствительного элемента потоком обезвоженного газа-носителя [12].

Мерой влажности является сила тока (количество электричества), необходимая для электрического разложения всей влаги, поглощенной в единицу времени, при строго стабилизированном расходе газа-носителя с извлеченной влагой.

Кулонометрический чувствительный элемент (рис. 3) представляет собой стеклянную трубку 1, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем влагопоглощающей пятиокиси фосфора 2. В канале стеклянной трубки по спирали вплавлены платиновые (родиевые) проволоочки 3, представляющие собой электроды. Они питаются постоянным током и разлагают влагу, поглощенную пятиокисью фосфора.

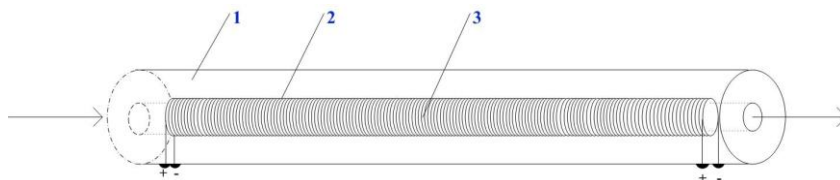


Рис. 3. Схема устройства кулонометрического чувствительного элемента

При работе чувствительного элемента в нем непрерывно протекают два параллельных процесса: поглощение влаги пятиокисью фосфора с образованием

фосфорного ангидрида (15) и электролитическое разложение влаги с восстановлением пятиоксида фосфора из образовавшегося фосфорного ангидрида (16):



Таким образом, прямое измерение содержания влаги в контролируемом газе-носителе с извлеченной из пробы жидкого диэлектрика влагой заменяется измерением силы тока, идущего на электролиз поглощенной влаги, и расхода газа, протекающего через датчик.

В настоящее время кулонометрический метод реализован в приборе ВТМ-МК, разработанном Ангарским ОКБА. На рис. 4 показана функциональная схема измерительного устройства. Проба анализируемого трансформаторного масла при помощи шприца-дозатора (объемом 2 мл) вводится в десорбционную колонку. Газ-носитель через стабилизатор давления газа проходит в кулонометрический осушитель 1 и поступает в десорбционную колонку 2. После барботирования пробы масла в десорбционной колонке газ-носитель с извлеченной влагой поступает в чувствительный элемент 3, где влага адсорбируется и проходит электролиз воды. Напряжение, пропорциональное току электролиза, снимается с делителя напряжения 5 и подается на один из аналоговых входов микроконтроллера 6. Напряжение U интегрируется микроконтроллером во времени, преобразуется в цифровой код, который поступает на индикаторное устройство 7. По окончании цикла измерения (цикл равен 15 мин.) проба масла через электромагнитный клапан сливается в дренаж¹¹.

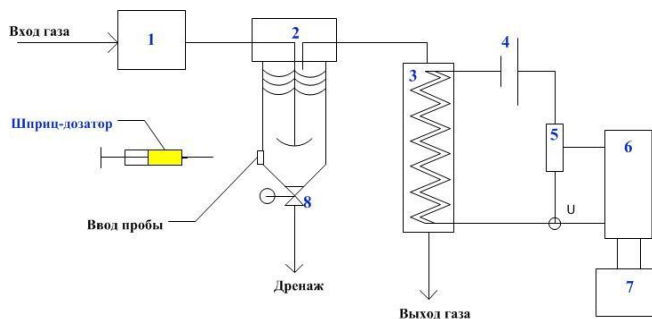


Рис. 4. Функциональная схема влагомера ВТМ-МК:

1 – кулонометрический осушитель; 2 – десорбционная колонка; 3 – кулонометрический чувствительный элемент; 4 – источник питания; 5 – делитель напряжения; 6 – микроконтроллер; 7 – индикаторное устройство; 8 – клапан

Кулонометрический метод обладает высокой чувствительностью и позволяет измерять микроконцентрацию влаги в образце, начиная с миллионных долей. Точность измерения влажности определяется точностями измерения силы тока и расхода газа. Этот метод может считаться абсолютным методом, не требующим эмпирической градуировки приборов. Основной недостаток этого метода связан с необходимостью использования газа для переноски влаги из масла к сорбенту. Полное извлечение влаги из масла при барботировании теоретически возможно только при бесконечном времени измерения. Использование барботирования в реальном приборе требует расчета количества влаги, оставшегося в масле после барботирования, в течение времени измерения. Точно выполнить эти расчеты для всех видов масел (новых и находящихся в эксплуатации длительное время) фактически невозможно. Барботированием легко извлекается вода до остаточной влажности 10–12 г/т, дальнейшее извлечение влаги требует длительного времени и для реальных измерений фактически невозможно. Количество влаги, оставшейся в масле после измерения, будет зависеть от химического состава и физических свойств масла.

К недостаткам приборов, реализующих данный метод, можно отнести:

- необходимость использования сухого воздуха или другого сухого газа-носителя; наличие в газе даже небольшого количества воды вызовет большую погрешность измерения;
- необходимость периодической регенерации кулонометрического осушителя и чувствительного элемента опасными химическими реагентами;
- высокую стоимость кулонометрического осушителя, а также кулонометрического чувствительного элемента (каждый порядка 1/6 стоимости самого прибора);
- высокую стоимость технического обслуживания и периодической поверки средства измерения;
- отсутствие стандартизированной или аттестованной методики, что затрудняет использование метода в аттестованных или аккредитованных лабораториях.

Хроматографические методы основаны на разделении воды и сопутствующих компонентов, в частности воздуха, в токе газа-носителя на колонке, заполненной адсорбентом, обычно модифицированным жидкой фазой или немодифицированным полимером, с последующим определением воды и сопутствующих компонентов с помощью детектора по теплопроводности (ДТП). СО 34.43.107–95¹⁰ «Методические указания по определению содержания воды и воздуха в трансформаторном масле» описывает три методики определения воды и воздуха, основанные на различных способах выделения этих веществ из масла. Пороговая чувствительность для влагосодержания (воды) всех предлагаемых методик в Методических указаниях не ниже 2 г/т.

Суть *первой методики* заключается в прямом вводе пробы масла (25–100 мкл) в испаритель, температура которого 250–300°C. При такой температуре вся вода (связанная, растворенная, эмульсионная), присутствующая в масле, переходит в газообразное состояние. Водяной пар газом-носителем (гелием) переносится сначала в предколонку, а затем в главную хроматографическую колонку, где происходит разделение. Регистрация аналитов осуществляется с помощью детектора по теплопроводности (ДТП). В СО 34.43.107–95¹⁰ указана насадочная колонка длиной 2–3 м с внутренним диаметром 2–3 мм, заполненная 15% ПЭГА на Полисорбе-1. В этом случае на первой минуте выходит пик воздуха, а время выхода воды составляет около 2 мин. Калибровка хроматографа осуществляется по этиловому спирту с известным содержанием воды, которое определяется хроматографическим методом добавок воды к калибровочному спирту.

В настоящее время методика чаще всего осуществляется на хроматографах российских фирм ЗАО СКБ «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола), НПФ «Мета-хром» (г. Йошкар-Ола), ООО «Хромос» (г. Дзержинск), ООО «Люмэкс» (г. Москва). На рис. 5 показан пример функциональной схемы определения воды и общего газосодержания в трансформаторных маслах. Специалисты компании СКБ «Хроматэк» рекомендуют разделение искомых веществ (воздуха и воды) проводить на насадочной колонке *Haesep Q* длиной 2 м с внутренним диаметром 2 мм. Время выхода определяемых веществ несколько уменьшается, так для воздуха время выхода составляет 0,370, для воды – 1,02 мин. Такая замена хроматографических колонок не позволяет решить основной недостаток методики определения влагосодержания с прямым вводом масла в испаритель. Для защиты основной хроматографической колонки от масла устанавливается предколонка, заполненная инертным материалом, например диатомитом, выдерживающим высокую (до 300°C) температуру. Колонку и предколонку после проведения серии анализов требуется регенерировать методом обратной продувки при высоких температурах: 150–160°C для колонки и 300–350°C для испарителя. При проведении такой операции электрическое питание ДТП отключают во избежание перегорания спирали. Общий объем вводимого до регенерации масла не более 0,6 мл. Иными словами, через 20–30 анализов при времени одного анализа не превышающем 5 мин, как минимум, один раз в неделю приходится останавливать процесс анализа и запускать режим регенерации колонок. Процесс регенерации занимает

порядка 3–5 часов, что очень критично при интенсивном потоке проб масла, особенно в период ремонтных компаний (весна – осень).

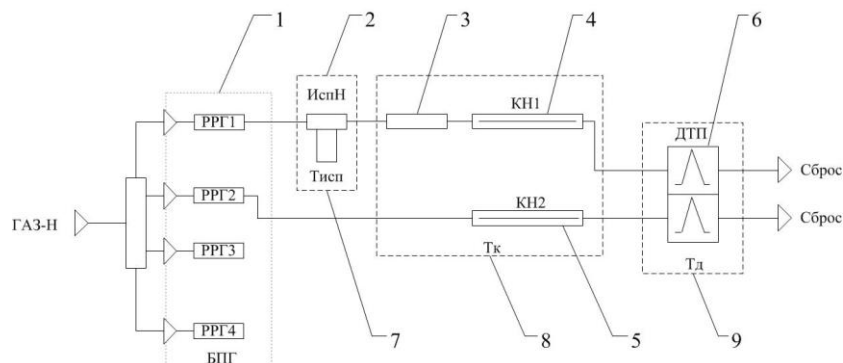


Рис. 5. Пример функциональной схемы хроматографа для определения общего газосодержания и воды в трансформаторном масле:

1 – блок подготовки газов; 2 – испаритель насадочный; 3 – предколонка; 4 – ГХ-колонка;
5 – сравнительная колонка; 6 – детектор; 7, 8, 9 – термостаты испарителя, колонок, ДТП

В методике ВТИ без вакуумирования приставки используют способ полного извлечения растворенной воды в масле.

Выделение и анализ воды основаны на нагревании пробы масла (1 мл) в реакционном сосуде при 100°C, перемещении паров воды потоком сухого гелия в колонку хроматографа, нагретую до комнатной температуры. После разделения пиков воздуха и воды происходит детектирование с помощью ДТП. Методика реализуется на любом газовом хроматографе с приставкой, которая подключается к хроматографу в линию газа-носителя перед колонками (рис. 6). Приставка состоит из реакционного сосуда 2 с термостатом 6, обеспечивающим нагрев масла, введенного для анализа, до 100°C; устройства для ввода пробы масла в реакционный сосуд и слива масла из него; металлических капиллярных трубок со штуцерами и накидными гайками, предназначенных для соединения всех частей приставки.

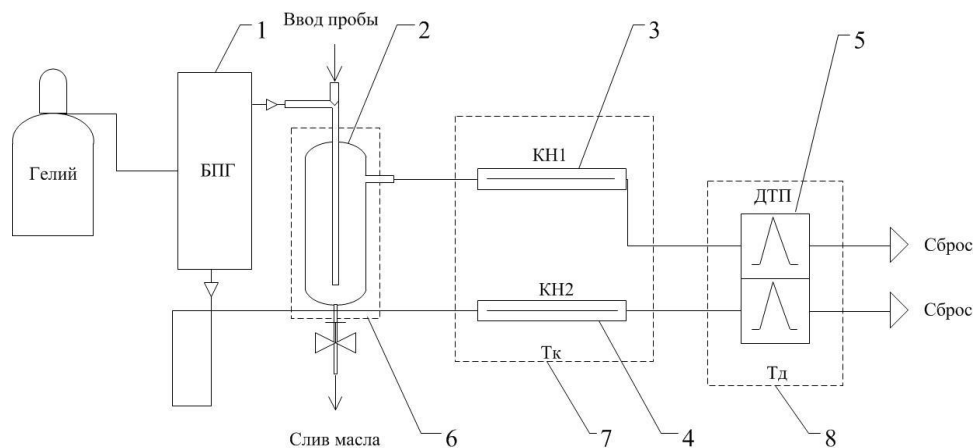


Рис. 6. Пример функциональной схемы определения общего газосодержания и воды в масле без вакуумирования с приставкой к хроматографу:

1 – блок подготовки газов; 2 – реакционный сосуд; 3 – ГХ-колонка; 4 – сравнительная колонка; 5 – детектор; 6, 7, 8 – термостаты реакционного сосуда, колонок, ДТП

Одна из основных трудоемких операций при использовании данного метода заключается в валидации методики, а именно в приготовлении калибровочных растворов и построении градуировочной зависимости. В качестве калибровочных растворов «Методические указания» регламентируют свежее масло марки ГК, насыщенное парами воды и воздуха. Для этого определённый объём масла продувается атмосферным воздухом при комнатной температуре в течение 15 мин. После установления коэффициента Генри проводят целый комплекс вычислительных операций по расчету концентрации воды в масле, которая прямо пропорциональна упругости паров воды в воздухе.

В «Методических указаниях» табличные и графические данные приведены только для марок масел ГК и Т-1500, в то время как в эксплуатации находятся и другие марки трансформаторных масел (ВГ, ТКп, Т-750, *Nitro 11GX*, *Nitro 10XN*, *Technol-2000*). Пределы влагонасыщения минеральных масел, вследствие их различного структурно-группового состава, отличаются между собой. Следовательно, перед определением концентрации влаги в эксплуатационном масле определенной марки необходимо приготовить калибровочные масла на основе этого же сорта масла, установить коэффициенты и поправки, и лишь после этого произвести все вышеописанные расчеты. Кроме того, калибровочные растворы готовятся на свежем масле, что может также внести свою погрешность при определении содержания влаги эксплуатационных окисленных масел.

Таким образом, газохроматографическое определение влагосодержания по второму способу извлечения займёт у специалистов лаборатории довольно продолжительное время. А также существует большая вероятность возникновения ошибок на каждой стадии анализа.

Первые два способа извлечения воды из пробы жидкого диэлектрика, в частности трансформаторного масла, базируются на процессах термодинамики. Испаритель хроматографа следует рассматривать как герметичный сосуд с постоянным давлением и температурой. Проба масла, содержащая некое количество воды, вводится в камеру испарителя, нагретого до 250–300°C. При таких условиях происходит испарение молекул воды не только с поверхности, но и в объеме жидкости. Молекулам воды и тяжелым углеводородам сообщается тепловая энергия, которая переходит в кинетическую энергию молекул, необходимую для преодоления барьера притяжения и покидания жидкости. Кинетическая энергия молекул воды в смеси различных углеводородов оказывается больше, поэтому вода быстрее переходит в парообразное состояние, чем остальные компоненты масла. Переход воды в пар ускоряется еще и за счет выхода мельчайших пузырьков газа (воздух, легкие углеводороды), всегда присутствующих в жидкости. Образовавшийся водяной пар из испарителя переносится потоком гелия в колонку, температура которой также высокая (150–160°C), что не позволяет воде конденсироваться на частях хроматографа. Поскольку объем пробы составляет всего лишь несколько микрограммов, а температура испарения очень высокая, данный процесс перехода воды в газовую фазу занимает несколько секунд. Однако стоит заметить, что такой тепловой энергии не хватает перевести в газовую фазу химически связанную воду, содержащуюся в любом минеральном масле, особенно эксплуатационном.

Во втором случае, когда в реакционный сосуд, нагретый до 100°C, вводят пробу масла 1 мл, корректное определение растворенной воды вообще сомнительно. Дело в том, что в закрытом сосуде при постоянной температуре и давлении наряду с испарением всегда происходит процесс конденсации пара. В начале нагревания интенсивность испарения выше скорости возврата молекул воды в жидкость. Когда количество «оторвавшихся» за единицу времени молекул становится равным количеству «вернувшихся» в жидкость, в замкнутой системе наступает равновесие, а пар называют насыщенным. Учитывая то, что объем пробы, вводимой в реакционный сосуд (1 мл), больше, чем в испаритель, процесс парообразования будет несколько продолжительнее. К тому же перевод всей растворенной воды из масла в пар возможен при температуре не ниже 120–130°C [13; 14]. В своих работах [13] авторы показали, что истинная растворимость воды в минеральном масле достигается при температуре около

120°C. При такой температуре растворенная вода линейно связана с относительной влажностью воздуха и на градуировочной зависимости наблюдается постоянство калибровочного коэффициента, что является залогом обеспечения точности метода. В копилку недостатков метода определения растворенной влаги без вакуумирования следует добавить возможность образования конденсированной воды как в самой хроматографической колонке, так и на других конструкциях хроматографа. Дело в том, что температура сосуда, в котором происходит выделение газообразной фазы воды из масла, составляет 100°C, а температура колонки – $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Молекулы нагретого пара, перенесенные газом-носителем из замкнутой емкости, при столкновении с относительно холодным материалом колонки будут отдавать им свою тепловую энергию. И по мере прохождения по разделительной колонке, а в целом – по системам прибора, пар постепенно конденсируется и на стенках образуется пленка конденсата, удалить которую потребуются много сил и времени. Все это приводит к нецелесообразности применения второго способа, указанного в Методических указаниях¹⁰.

Третий способ – *методика анализа с использованием равновесного извлечения растворенной воды из масла в устройстве УИВВМ (методика ВНИИЭ)*. Данная методика, как и предыдущие способы газохроматографического определения, распространяется на эксплуатационные и свежие трансформаторные масла.

Метод заключается во введении пробы масла в предварительно вакуумированный испытательный сосуд, установлении равновесия между жидкой и газовой фазами, определении давления в системе h_1 по масляному манометру, вакуумировании надмасляного пространства и определении нового давления h_2 после перемешивания пробы масла и установления равновесия между жидкой и газовой фазой. Используя найденные величины, проводят вычисления по содержанию влаги в масле.

Описанный метод, также как и предыдущий, очень трудоёмкий и в плане непосредственного выполнения анализа, и в плане обработки результатов испытаний. Немаловажным недостатком такого способа извлечения влаги из масла и ее определения является и то, что коэффициент растворимости B_1 меняется для разных марок масел, и поэтому его необходимо устанавливать в каждом конкретном случае. Особенно это сложно осуществить, когда на анализ поступают пробы масла не одного конкретного сорта трансформаторного масла, а, как минимум, смесь двух марок масел, что в последнее время часто происходит в результате доливок в маслonaполненное высоковольтное оборудование.

В настоящее время из всех предложенных газохроматографических методов определения влаги в масле наибольшей популярностью пользуется аттестованная методика, разработанная специалистами компании НПО «Электрум» [9]. Методика выполняется в хроматографах разных фирм. Градуировка в данной методике проводится по растворам воды в ацетонитриле, приготовленным методом добавок: анализируют изначально осушенный ацетонитрил (там все равно будет пик остаточной воды), добавляют некоторое количество воды и снова анализируют. По приращению пика определяется коэффициент чувствительности. С помощью ацетонитрила происходит извлечение влаги и из пробы масла. Дозу полученного экстракта с аналитом вводят микрошприцем в испаритель хроматографа. После чего потоком газа-носителя проба перемещается по хроматографической колонке *HayeSep N* длиной 2 м с внутренним диаметром 2 мм, где происходит деление искомого компонента. Пик воды идентифицируется с помощью ДГП. Такой способ извлечения влаги из пробы масла позволяет избежать частой и продолжительной регенерации колонок.

В целом к достоинствам методик определения влагосодержания жидких диэлектриков методом газовой хроматографии следует отнести:

- высокую чувствительность (2 г/т);
- широкий диапазон измерения (2–200 г/т);
- относительную погрешность измерения (10%);

- малый объем пробы масла для проведения одного анализа в случае первого способа извлечения (25–100 мкл);

- в случае прямого ввода пробы масла в испаритель время анализа составляет не более 10 мин.

Главными недостатками газохроматографических методов являются:

- высокая стоимость оборудования (хроматографа) и его комплектующих частей;
- наличие высококвалифицированных специалистов, работающих на хроматографических комплексах;

- необходимость аттестации персонала, обслуживающего сосуды под давлением;
- высокая стоимость обязательного периодического технического обслуживания комплекса;

- токсичность ацетонитрила, который используется в ГХ-методике НПО «Электрум»;
- ведение строгого учета прихода и расходования ацетонитрила, поскольку он входит в перечень прекурсоров.

В последнее время для контроля состояния жидкой изоляции исследователи все больше обращаются к *спектральным методам* исследования жидких диэлектриков, таким как ИК-спектроскопия, люминесцентная спектроскопия, ЯМР- и ЭПР-спектроскопия.

Спектроскопия представляет собой современный инструментальный метод количественного и качественного анализа различных объектов. Спектроскопические методы основаны на взаимодействии анализируемого образца с электромагнитным излучением. В результате поглощения части энергии составляющими вещество молекулами, свободными атомами или ионами записываются спектры поглощения с характеристическими полосами для данного компонента. Так в случае спектроскопии появление в ближней инфракрасной области спектра интенсивной комбинационной полосы около 1940 нм и менее интенсивной первый обертона около 1420 нм указывает на наличие воды в исследуемом образце. По интенсивности полосы поглощения воды около 1930–1940 нм основано количественное определение воды в анализируемом объекте [15]. Авторами работы [16] приведены результаты исследования спектральных характеристик разных марок изоляционных масел, содержащих растворенную воду. С помощью ¹H и ¹³-C ЯМР-спектроскопии предложен способ идентификации в трансформаторном масле доли дисперсной воды, которая методом титрования по Карлу Фишеру не определяется [17].

К основным факторам, сдерживающим внедрение спектроскопических методов исследования жидких диэлектриков в ежедневную лабораторную практику, можно отнести:

- необходимость высокого профессионализма специалистов лабораторий;
- высокую стоимость спектральных приборов;
- подбор кювет, материал которых должен быть инертен по отношению к воде;
- трудоемкую операцию по созданию базы спектрограмм как свежих, так и эксплуатационных изоляционных жидкостей.

Несмотря на некоторые неудобные моменты, методы спектроскопии по сравнению с физико-химическими и химическими методами являются более перспективными. Измерения проводятся достаточно быстро. Не требуется предварительная подготовка образца и применение химических реактивов. Из измеренных спектров можно получить информацию не только о количественном содержании воды, но и о физических свойствах (размер частиц, вязкость, плотность), структурно-групповом составе жидких диэлектриков, степени старения по появлению окисленных форм соединений в изоляционных жидкостях [18–20].

Заключение

Интерес многих исследователей к поиску и разработке рациональных методов определения влагосодержания в диэлектрических жидкостях не ограничивается рассмотренными методами и продолжается до сих пор. Тем не менее, остается признать, что на сегодняшний день не существует технологии, позволяющей идентифицировать общую

(суммарно) воду и воду в разных формах (связанную, растворенную, эмульсионную) при одновременном их присутствии в такой сложной системе как «вода–изоляционная жидкость». А между тем, знание и понимание поведения воды в жидких диэлектриках, образование одной формы воды из другой при определенных воздействиях (температура, ионные примеси) с последующей количественной оценкой каждой из них представляет практический интерес. Совершенно очевидно, что при разработке метода упор необходимо делать на стремление достичь более полное извлечение воды из материала, сохранив при этом высокую чувствительность и точность. Мечтой каждого специалиста при выполнении анализа также является отсутствие мешающих факторов, побочных процессов или реакций, непродолжительное время пробоподготовки и короткое время непосредственно самого испытания, а в целом – получение достоверной информации о концентрации воды в изоляционной среде высоковольтного оборудования. «Правильный» результат анализа чрезвычайно важен для регламентной диагностики состояния, особенно в условиях, когда в эксплуатации находится большое количество маслонаполненного электрооборудования с превышающим назначенный срок службы. Выявленные своевременно отклонения от норм способствуют быстрому принятию решения о проведении мероприятий по доведению изоляционных характеристик жидких диэлектриков до норм (вакуумная сушка, замена и др.), а значит, дают возможность продлить «жизнь» трансформатора и, как следствие, обеспечить надежное электроснабжение.

Литература

1. Russell M. Experiences in service with new insulating liquids. M. Russell, H. Athanassatou, J.C. Duart, Ch. Perrier, I. Sitar, J. Walker. Proc. of 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. Paper A2–35.
2. MIDEL 7131 и MIDEL eN Synthetic Ester. Режим доступа: <http://www.midel.com> (Дата обращения: 20.03.2017).
3. Envirotemp FR3 fluid. Режим доступа: <http://www.envirotempfluids.com> (Дата обращения: 20.03.2017).
4. BIOTEMP. Biodegradable Dielectric Insulating Fluid. Режим доступа: <http://www.abb.com/transformers> (Дата обращения: 20.03.2017).
5. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
6. N'cho J. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. J. N'cho, I. Fofona, Y. Hadjadj, A. Beroual. J. Energies, 2016, No. 9 (367). pp. 2–29.
7. Аракелян В.Г. Диагностика состояния изоляции маслонаполненного оборудования по влагосодержанию масла // Электротехника. 2004. № 3. С. 34–39.
8. Коробейников С.М. Диэлектрические материалы: учебное пособие, Новосибирск: НГТУ, 2000. 67 с.
9. Хроматографический анализ трансформаторного масла // Материалы семинара СКБ «Хроматэк», 2009. Режим доступа: <http://chromatec.ru> (Дата обращения: 25.03.2017).
10. Митчел Дж., Смит Д. Акватметрия. М.: Издательство иностранной литературы, 1952. 424 с.
11. Margolis S.A. Sources of Systematic Bias Reflected in an ASTM Collaborative Study on Water in Oil Measured by the Karl Fischer Method. Electrical Insulating Materials: International Issues, ASTM STP 1376, M.M. Hirschler, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000. pp. 59–69.
12. Аналитические средства контроля параметров трансформаторного масла. Режим доступа: <http://www.okba.ru> (Дата обращения: 25.03.2017).
13. Колушев Д.Н., Широков А.В., Ротберт И.Л., Козлов В.К. Контроль влагосодержания изоляции силовых трансформаторов: доклад. Режим доступа: <http://www.sibdiag.ru> (Дата обращения: 13.05.2017).
14. Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. М.: Энергия, 1980. 240 с.
15. Крищенко В.П. Ближняя инфракрасная спектроскопия. М.: КРОНА-ПРЕСС, 1997. 638 с.

16. Захарич М.П., Зайцев И.И., Комар В.П., Никанович Ф.Н., Рыжков М.П., Скорняков И.В. Анализ трансформаторного масла с использованием ИК анализаторов // Журнал прикладной спектроскопии. 2001. V. 68. № 1. С. 47–50.
17. Суханов А.А., Гнездилов О.И., Туранова О.А., Валиуллина Д.М., Козлов В.К., Туранов А.Н. ЭПР- и ЯМР-спектроскопия трансформаторного масла // Химия и технология топлив и масел. 2013. № 3. С. 47–52.
18. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш., Туранов А.Н. Люминесценция трансформаторного масла марки ГК // Химия и технология топлив и масел. 2012. № 6. С. 54–56.
19. Тонгоногов Б.П., Дорогочинская В.А., Багдасаров Л.Н., Можайская Е.В. Разработка экспресс-метода определения вязкости, индекса вязкости и температуры застывания базовых масел методом ИК-спектрометрии // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 1. С. 46–51.
20. Маркова Л.В., Мышкин Н.К., Макаренко В.М. Флуоресцентный метод оперативного контроля трансформаторного масла // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 2. С. 46–51.

Авторы публикации

Коробейников Сергей Миронович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность труда» Новосибирского государственного технического университета, E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru.

Лютикова Марина Николаевна – канд. хим. наук, ведущий инженер-руководитель лаборатории «Служба диагностики» филиала ПАО «ФСК ЕЭС» – Ямало-Ненецкое ПМЭС. E-mail: m.lyutikova@mail.ru.

References

1. Russell M. Experiences in service with new insulating liquids. M. Russell, H. Athanassatou, J.C. Duarte, Ch. Perrier, I. Sitar, J. Walker. Proc. of 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. Paper A2–35.
2. MIDEL 7131 and MIDEL eN Synthetic Ester. Available at: <http://www.midel.com> (Accessed date: 20.03.2017).
3. Envirotemp FR3 fluid. Available at: <http://www.envirotempfluids.com> (Accessed date: 20.03.2017).
4. BIOTEMP. Biodegradable Dielectric Insulating Fluid. Available at: <http://www.abb.com/transformers> (Accessed date: 20.03.2017).
5. Lipstein R.A., Shakhnovich M.I. Transformer oil - 3rd edition. M. Energoatomizdat. 1983. 296 p.
6. N'cho J. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. J. N'cho, I. Fofona, Y. Hadjadj, A. Beroual. J. Energies, 2016, No. 9 (367). P. 2–29.
7. Arakelyan V.G. Diagnostics of insulation status of oil-filled equipment on oil moisture content. Elektrotehnika. 2004. No. 3. P. 34–39.
8. Korobeynikov S.M. Insulating materials: Study guide, Novosibirsk, NSTU, 2000. 67 p.
9. Chromatographical analysis of dielectric oil."Chromatec" special design bureau seminar materials, 2009. Available at: <http://chromatec.ru> (Accessed date: 25.03.2017).
10. G. Mitchell, D. Smith. Aquametry. M.: Foreign literature publishing house, 1952. P. 424.
11. Margolis, S.A. Sources of Systematic Bias Reflected in an ASTM Collaborative Study on Water in Oil Measured by the Karl Fischer Method. Electrical Insulating Materials: International Issues, ASTM STP 1376, M.M. Hirschler, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000. P. 59–69.
12. Analytical tools of dielectric oil parameters control. Available at: <http://www.okba.ru> (Accessed date: 25.03.2017).
13. Kolushev D.N., Shirokov A.V., Rothbert I.L., Kozlov V.K. Control of power transformers insulation moisture content. Report. Available at: <http://www.sibdiag.ru> (Accessed date: 13.05.2017).
14. Krichevskiy E.S., Benzar V.K., Venediktov M.V. Theory and practice of express control of moisture content of solid and liquid materials. M.: Energiya, 1980. 240 p.
15. Krishchenko V.P. Near-infrared spectroscopy. M.: KRONA-PRESS, 1997. 638 p.

16. Zakharich M.P., Zaytsev I.I., Komar V.P., Nikanovich F.N., Ryzhkov M.P., Skornyakov I.V. Dielectric oil analysis with use of IR spectrometer. Magazine of applied spectrography. 2001. Vol. 68.No..1. P. 47–50.

17. Sukhanov A.A., Gnezdilov O.I., Turanova O.A., Valiullina D.M., Kozlov V.K., Turanov A.N. EPR- and NMR spectroscopy of dielectric oil. Chemistry and technology of fuels and oils. 2013. No. 3. P. 47–52.

18. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh., Turanov A.N. Luminiscence of GK type dielectric oil. Chemistry and technology of fuels and oils. 2012. No. 6. P. 54–56.

19. Tongonogov B.P., Dorogochinskaya V.A., Bagdasarov L.N., Mozhayskaya E.V. Development of express method of definition of thickness, thickness index and base oils chilling temperature using infrared spectrometry method. Chemistry and technology of fuels and oils. 2016. No. 1. P. 46–51.

20. Markova L.V., Myshkin N.K., Makarenko V.M. Fluorescence analysis of dielectric oil operation monitoring// Chemistry and technology of fuels and oils. 2016. No. 2. P. 46–51.

Authors of the publication

Sergey M. Korobeynikov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, head of “Labor safety” department, Novosibirsk State Technical University. E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru.

Marina N. Lyutikova – Cand. Sci. (Chemical), leading engineering – head of laboratory of Diagnostics Service of the branch of public joint-stock company “FGC UES” – Yamalo-Nenetsk enterprises of the main power networks. E-mail: m.lyutikova@mail.ru.

Поступила в редакцию

18 мая 2017 г.

УДК 66.041.45

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ОТ ФАКЕЛА В КОТЛАХ С РАЗЛИЧНОЙ КОМПОНОВКОЙ ГОРЕЛОК

Е.А. Салтанаева, М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин,
Аль Зубайди Али Талиб Салих

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В статье приведены результаты экспериментального исследования режимных параметров работы энергетических котлов ТЭС БКЗ-320-13,8 и ТГМ-84Б при сжигании газа и при сжигании мазута. Приведены значения тепловых потоков от факела в топках котлов. Рассмотрена эффективность восходящей крутки факела в топке котлов.

Ключевые слова: сжигание, мазут, топка, котел, КПД, теплота сгорания, температура, избыток воздуха, тепловые потоки, режимы.

THERMAL FLOWS FROM THE TORCH IN BOILERS WITH A DIFFERENT BURNER BURNER

M.A.Taymarov, E.A. Saltanaeva, R.V. Akhmetova, R.G. Sungatullin,
Al-Zubaidi Ali Talib Saleh

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The article presents the results of an experimental study of regime parameters of energy TPP boiler BKZ-320-13,8 TGM-84B and the combustion gas and while burning fuel oil. The values of heat flow from the torch in boiler furnaces the efficiency of the upward twist of the torch in the furnace of the boilers.

Keywords: burning, fuel oil, furnace, boiler efficiency, heat of combustion, temperature, excess air, heat flows, modes.

Введение

На котлах ТЭС для повышения КПД применяются различные схемы сжигания топлив в зависимости от их состава, влажности, теплоты сгорания, агрегатного состояния [1–5]. При этом в схемах используется изменение крутки воздуха, повышение температуры воздуха, подаваемого на горение, изменение давления сжигаемого природного газа и мазута по ярусам горелок, изменение давления распыливающего пара. В качестве способа для повышения КПД при сжигании высоко обводненного мазута применяется смешанное сжигание мазута с природным газом. В связи с тенденцией применения на котлах ТЭС в качестве топлива метановодородной смеси, являющейся побочным продуктом глубокой переработки нефти на НПЗ, актуальным является тема исследования сжигания такой смеси в топках этих котлов. Все эти вопросы рассматриваются в данной статье.

Объекты и методика исследования

Эксперименты проведены на паровых котлах БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 и ТГМ-84Б (станционный № 10) на Казанской ТЭЦ-1 [6; 7]. Котел БКЗ-320-13,8 однобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией,

газоплотный, с мембранными экранами. Основное топливо – газ, резервное – кузнецкий уголь с твердым шлакоудалением. В верхней части топки расположен ширмовый пароперегреватель. Во втором (горизонтальном) газоходе расположены ступени экономайзера и трубчатого воздухоподогревателя, установленные «в рассечку». Объем топки 995 м^3 , водяной объем 88 м^3 , паровой объем 30 м^3 . Топка имеет 8 прямооточных пылегазовых горелок мощностью по 35 МВт, 4 сбросных сопла и 6 сопел нижнего дутья. Горелки расположены на боковых стенках топки котла БКЗ-320-13,8 таким образом, чтобы при сжигании топлива в центре топки образовывалось восходящее кверху ядро факела диаметром 1,5 м (рис. 1).

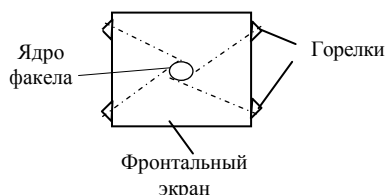


Рис. 1. Поперечное сечение топки котла БКЗ-320-13,8 на уровне горелок с расположением ядра факела

Подача пыли в горелки осуществляется системой пневмотранспорта угольной пыли высокой концентрации под давлением. Для сжигания газа в горелке установлен газовый коллектор, оборудованный шестью газораздающими трубами, заведенными в канал вторичного воздуха. Отработавший сушильный агент подается в топку выше зоны активного горения через 4 прямооточных сбросных сопла. Сопло аэросмеси расположено в воздушном канале, в который подается горячий воздух, необходимый для охлаждения сопла аэросмеси при отсутствии подачи на него сушильного агента. Для снижения выбросов оксидов азота предусмотрена подача горячего воздуха в холодную воронку через 6 сопел нижнего дутья. Для снижения концентрации оксидов азота, снижения максимальных локальных тепловых потоков в топке и регулирования температуры пара при работе на газе предусмотрена рециркуляция дымовых газов, забираемых перед дымососами и направляемых при помощи дымососов рециркуляции газов ДН-15БГМ к смесителям, установленным в воздушном трубопроводе перед горелками. Радиационная ступень пароперегревателя выполнена в виде панелей, экранирующих верхнюю часть фронтальной стены и потолок топки. Полурадиационная часть выполнена в виде ширмовых пароперегревателей, расположенных на выходе из топки. Конвективная часть состоит из первой, третьей, четвертой ступеней, расположенных в горизонтальном газоходе. Котел оборудован 2 дутьевыми вентиляторами типа ВД-20. Регулирование производительности осуществляется направляющим аппаратом осевого типа. Для удаления дымовых газов установлено 2 дымососа типа ДН-22Х2Ф. Регулирование производительности осуществляется направляющим аппаратом осевого типа. Для обеспечения требуемой температуры воздуха на входе в первую ступень воздухоподогревателя подогрев воздуха осуществляется рециркуляцией части горячего воздуха на всасывание дутьевого вентилятора. Очистка дымовых газов от золы осуществляется при помощи мокрого золоуловителя МВ-ИРО.

Котел ТГМ-84Б имеет П-образную компоновку. В топке расположены экраны, радиационный настенный и потолочный пароперегреватели. В горизонтальном газоходе размещен ширмовый пароперегреватель. В опускном газоходе расположены конвективный пароперегреватель и водяной экономайзер. В области водяного экономайзера канал опускного газохода разделен на два газохода. Топка имеет объем 1557 м^3 , в поперечном по высоте сечении представляет прямоугольник с размерами $6 \times 17,7 \text{ м}$. Полная радиационная поверхность топки $H_{\text{п}} = 1100 \text{ м}^2$. Боковые и задние стенки топочной камеры экранированы трубами $\varnothing 60 \times 6 \text{ мм}$ с шагом 64 мм. Температура питательной воды 230°C , температура

горячего воздуха при сжигании газа 238°C, а при сжигании мазута 268°C. Для регулирования температуры перегрева пара имеется 3 ступени впрыска собственного конденсата. Наклонные трубы защищены от излучения факела слоем огнеупора.

Методика исследования и оборудование подробно описаны в работах [8–10]. Измерения тепловых потоков от факела в топках котлов проводились при помощи радиометра ТЕРА-50. Температура факела в пристеночном слое измерялась с помощью двоянных хромель-алюмелевых термопар [5; 11]. Температура светящегося факела измерялась с помощью инфракрасного пирометра TESTO-835-T2 с погрешностью измерений $\pm 2,5^\circ\text{C}$ при 1500°C. Содержание кислорода измерялось в режимном сечении в рассечке водяного экономайзера при помощи прибора ДАГ-500 с погрешностью $\pm 0,2\%$. Температура уходящих газов измерялась в балансовом сечении после дымососа штатными приборами. Погрешность определения КПД составляла $\pm 3,5\%$.

Полученные результаты исследования и их обсуждение

При проведении экспериментов на котле БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 сжигался природный газ с теплотой сгорания 34508,8 кДж/м³. Показатели работы котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 во время экспериментов приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, при сжигании газа имеется максимальное значение КПД, равное 94,33% при паровой нагрузке 220 т/ч. При максимальной нагрузке 320 т/ч КПД имеет наименьшее значение. Температура уходящих газов при нагрузке 320 т/ч составляет 142°C, что является очень высоким значением.

Таблица 1

Показатели работы котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 во время экспериментов при сжигании природного газа с теплотой сгорания 34508,8 кДж/м³ при нагрузке 195 т/ч и расходе газа 14830 м³/ч

Показатель	Паровая нагрузка Дк, т/ч					
	140	195	220	260	290	320
Температура пара до 1-го впрыска, °C	405/390	410/395	415/400	425/400	410/410	410/410
Температура пара за 1-м впрыском, °C	395/390	395/390	405/395	420/400	375/375	380/375
Температура пара до 2-го впрыска, °C	530/525	540/530	535/530	530/525	525/520	525/525
Температура пара за 2-м впрыском, °C	515/525	520/530	520/525	520/515	510/510	515/515
Температура перед горелками, °C	350	380	390	405	425	435
Давление воздуха перед горелками, кгс/м ²	15	20	35	45	85	100
Содержание O ₂ в режимном сечении, %	3,1	2,6	2,4	2,0	1,9	1,7
Избыток воздуха в режимном сечении	1,16	1,13	1,12	1,10	1,09	1,08
Температура уходящих газов, °C	119	122	125	132	139	142
Потери тепла с уходящими газами, %	4,85	4,91	4,96	5,14	5,40	5,55
Потери тепла в окружающую среду, %	1,02	0,87	0,71	0,60	0,54	0,49
Содержание NO _x при $\alpha = 1,4$	165	178	183	187	203	216
Удельный расход топлива, кг у.т./Гкал	151,9	151,5	151,4	151,6	152,0	152,0
КПД котла брутто, %	94,03	94,22	94,33	94,26	94,06	93,96

На рис. 2 показаны значения тепловых потоков от факела, замеренные через смотровые лючки котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 при нагрузке 195 т/ч и расходе газа 14830 м³/ч.

Как видно из рис. 2, значения тепловых потоков имеют довольно высокие значения по всему топочному объему. Это связано с тем, что горение топлива происходит по высоте, а не по глубине топки на уровне горелок.

В табл. 2 приведены показатели работы котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при сжигании природного газа с теплотой сгорания 35367,8 кДж/м³.

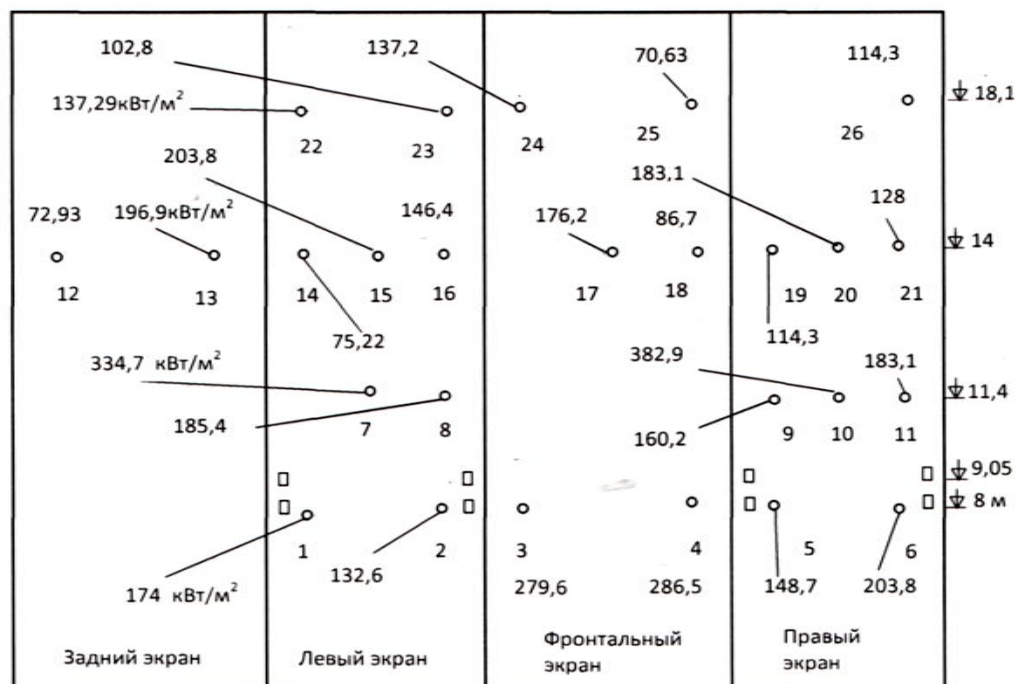


Рис. 2. Тепловые потоки от факела в топке котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 при нагрузке 195 т/ч и расходе газа 14830 м³/ч (содержание кислорода 2,7%, температура уходящих газов 110°C, коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,13$)

Таблица 2

Показатели работы котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при сжигании природного газа с низшей теплотой сгорания 35367,8 кДж/м³ при нагрузке 195 т/ч и расходе газа 14830 м³/ч

Показатель	Паровая нагрузка Дк, т/ч						
	195	220	260	300	340	380	420
Температура пара за 1 впрыском, °C	330/320	330/325	330/325	330/325	330/325	330/325	325/320
Температура пара за 2 впрыском, °C	380/360	380/370	370/365	360/360	355/345	345/345	340/340
Температура пара за 3 впрыском, °C	470/470	480/475	475/470	470/475	460/460	455/455	450/450
Расход газа, тыс.м³/ч	13,0	16,5	19,7	23,0	26,5	29,8	33,1
Давление газа перед горелками, кгс/см²	0,18	0,24	0,3	0,2	0,25	0,3	0,35
Содержание O₂ в режимном сечении, %	2,1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,7
Избыток воздуха в режимном сечении	1,1	1,095	1,095	1,090	1,084	1,079	1,079
Температура уходящих газов, °C	133	134	135	137	138	141	143
Потери тепла с уходящими газами, %	5,74	5,67	5,67	5,66	5,69	5,78	5,86
Потери тепла в окружающую среду, %	0,84	0,69	0,58	0,50	0,44	0,40	0,36
Удельный расход топлива, кг у.т./Гкал	152,8	152,6	152,4	152,6	152,8	152,4	152,3
Содержание NO _x при $\alpha=1,4$	130	140	150	165	180	195	210
КПД котла brutto, %	93,42	93,64	93,75	93,83	93,87	93,82	93,78

Как видно из табл. 2, КПД котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 ниже по сравнению с данными для котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2. Температура продуктов сгорания в топке не

достаточна для получения перегретого пара с повышенной температурой. Температура пара для котла ТГМ-84Б после 3-го впрыска ниже температуры пара за 2-м впрыском котла БКЗ-320-13,8 в среднем на 60°C. Сжигание газа в топке котла ТГМ-84Б происходит преимущественно в сечении горелок по глубине топки в сравнении с котлом БКЗ-320-13,8, в котором горение происходит по высоте топки.

На рис. 3 показаны значения тепловых потоков от факела в топке котла ТГМ-84Б при нагрузке 240 т/ч при расходе газа 18600 м³/ч. Направления круток во время экспериментов по номерам горелок приведены в табл. 3. Тепловые потоки в топке котла ТГМ-84Б имеют более низкие значения по сравнению с котлом БКЗ-320-13,8.



Рис. 3. Тепловые потоки от факела в топке котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при нагрузке 240 т/ч и расходе газа 18600 м³/ч (температура уходящих газов 129°C, коэффициент избытка воздуха 1,095)

Таблица 3
Направления круток по номерам горелок котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1

Номера горелок	1	2	3	4	5	6
Направление крутки	Левое	Левое	Правое	Правое	Левое	Левое
Угол наклона лопаток β	45	30	30	30	45	60
Параметр тангенциальной крутки nt	1,049	0,633	0,633	0,633	1,049	1,692

В табл. 4 приведены значения показателей работы котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при сжигании мазута М100 с теплотой сгорания 35367,8 кДж/м³. Как видно из табл. 4, значения КПД при сжигании мазута М100 в топке котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 ниже величин, полученных при сжигании газа, в среднем на 0,9%. Содержание NO_x при сжигании мазута возрастает в среднем в 2,24 раза по сравнению с сжиганием газа. Однако при сжигании газа в топке котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 значения концентрации NO_x выше в 1,11 раза по сравнению с котлом ТГМ-84Б

(станционный № 10) на Казанской ТЭЦ-1 вследствие более высоких значений тепловых потоков от факела.

Таблица 4

Показатели работы котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при сжигании мазута М100 с низшей теплотой сгорания 38673,7 кДж/кг с паромеханическими форсунками ФУЗ-5000 (ГПМ-050.000)

Показатель	Паровая нагрузка Дк, т/ч						
	185*	230	270	300	340	380	420
Температура пара за 1-м впрыском, °С	320/320	350/350	350/350	340/340	340/330	340/340	335/340
Температура пара за 2-м впрыском, °С	360/360	380/380	380/380	380/370	375/370	370/370	370/370
Температура пара за 3-м впрыском, °С	420/420	460/460	460/460	470/460	465/470	455/455	460/465
Расход мазута, т /ч	10,6	15,8	18,5	20,5	23,3	26,0	28,8
Давление мазута на форсунках, кгс/см ²	8,0	7,5	9,0	11,0	11,5	14,5	16,5
Давление пара на распыл, кгс/см ²	5	7	8	9	11	12	13
Содержание О ₂ в режимном сечении, %	5,1	3,7	3,3	3,0	2,5	2,2	1,8
Избыток воздуха в режимном сечении	1,305	1,203	1,177	1,158	1,128	1,111	1,089
Температура уходящих газов, °С	148	150	151	153	155	157	160
Потери тепла с уходящими газами, %	7,24	6,68	6,58	6,54	6,46	6,46	6,47
Потери тепла в окружающую среду, %	0,82	0,66	0,56	0,50	0,44	0,40	0,36
Удельный расход топлива, кг у.т./Гкал	150,2	154,2	153,8	153,7	153,5	153,4	153,3
Содержание NO _x при α= 1,4	300	327	350	370	395	427	460
КПД котла брутто, %	91,95	92,66	92,86	92,96	93,10	93,15	93,17
*) – работа на 4-х горелках с температурой перегретого пара 530°С							

Температура уходящих газов при нагрузке 420 т/ч для котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при сжигании мазута М100 выше в среднем на 17°С по сравнению с сжиганием газа. Однако по сравнению с котлом БКЗ-320-13,8 (станционный №7) на Казанской ТЭЦ-2 значения температуры уходящих газов в среднем на 11°С выше при сжигании мазута в котле ТГМ-84Б. Восходящая крутка факела в котле БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) при сжигании газа приводит к повышенному значению температуры уходящих газов по сравнению с горением факела в топке котла ТГМ-84Б.

Значения падающих тепловых потоков от факела при сжигании мазута М100 в котле ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 показаны на рис. 4.

Как видно из рис. 4, тепловые потоки от факела при сжигании мазута в топке котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 приближаются к значениям потоков при сжигании газа в топке котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 при нагрузке 195 т/ч (см. рис. 2).

Сравнение распределений тепловых потоков от факела по высоте топок для котлов с различными крутками показано на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что восходящая крутка факела в котле БКЗ-320-13,8 характеризуется высокими значениями тепловых потоков по всей высоте топок. Значения тепловых потоков приближаются к величинам в топках мощных котлов ТГМП-344, имеющих двухъярусное фронтальное расположение горелок, аналогичное котлу ТГМ-84Б.

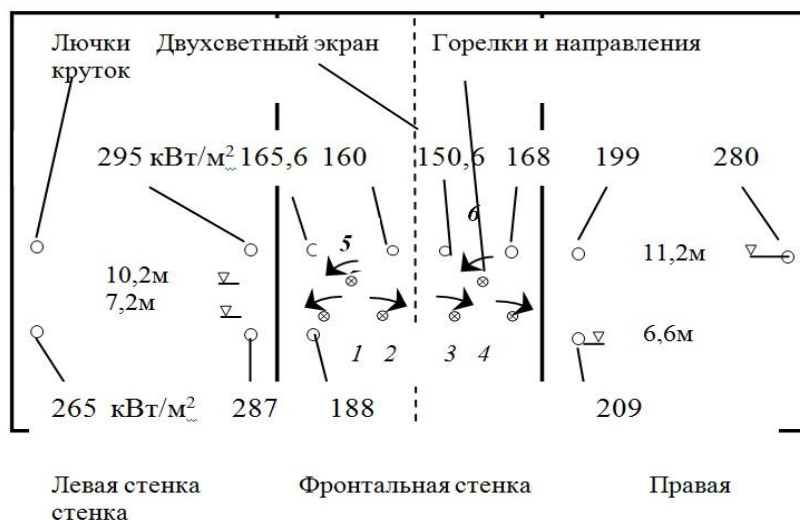


Рис. 4. Тепловые потоков от факела в топке котла ТГМ-84Б (станционный № 10) во время экспериментов на Казанской ТЭЦ-1 при нагрузке 360 т/ч и расходе мазута 22,3 т/ч

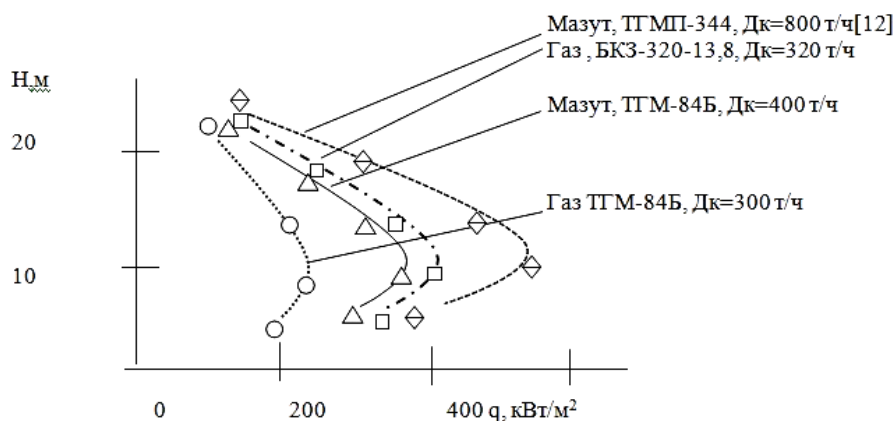


Рис. 5. Сравнительные данные по тепловым потокам от факела при различных крутках и видах сжигаемого топлива

Выводы

1. Восходящая крутка факела в топке котла БКЗ-320-13,8 (станционный № 7) на Казанской ТЭЦ-2 при сжигании газа характеризуется большими значениями тепловых потоков от факела, превосходящими значения тепловых потоков при сжигании всех видов топлива в топке котла ТГМ-84Б, что позволяет повысить КПД.

2. Восходящая крутка факела в топке котла БКЗ-320-13,8 характеризуется более равномерным распределением тепловых потоков по экранам, что позволяет снизить локальные термические перенапряжения труб и избежать их перегрева при высоких нагрузках.

Литература

1. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод, С.-П., АОО НПО ЦКТИ. 1998, 258 с.

2. Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С. Теория горения и взрыва: учебное пособие для вузов. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
3. Таймаров М.А., Додов И.Р., Степанова Т.О. Сжигание сбросных газов для теплофикации в нефтехимии // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. Вып. 24. С. 95–98.
4. Таймаров М.А., Садыков Р.А., Чайковский В.Г. Измерение температур и падающих потоков в топке котла ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 // Вестник машиностроения. 2016. № 2. С. 36–38.
5. Ahrenfeldt J., Thomsen T.P., Henriksen U., Clausen L.R. Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives // Applied Thermal Engineering. 2013. № 50. P. 1407–1417.
6. Таймаров М.А. Практические занятия на ТЭЦ. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2003. 64 с.
7. Таймаров М.А., Ахметова Р.В. Газомазутные горелки: учебное пособие. Казань: Издательство ООО «ИПК «Бриг», 2016. 80 с.
8. Трёмбовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия. 1977, 297 с.
9. Таймаров М.А. Лабораторный практикум по курсу «Котельные установки и парогенераторы». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. 107 с.
10. Танатаров М.А., Ахметшина М.Н., Фасхутдинов Р.А. Технологические расчеты установок переработки нефти. М.: Химия, 1987. 352 с.
11. Gelderen L, Malmquist L.M.V. Jomaas G. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. 2017. P. 558–537.
12. Абрютин А.А. Особенности теплообмена в топке мощного мазутного котлоагрегата с подовой компоновкой горелок4 // Электрические станции. 1981. № 9. С. 27–30.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ) E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Салтанаева Елена Андреевна – старший преподаватель кафедры «Информатика и информационно-управляющие системы» (ИИУС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: elena_maister@mail.ru.

Ахметова Римма Валентиновна – старший преподаватель кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: shila@bk.ru.

Сунгатуллин Раис Газимуллович – старший преподаватель кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: raesg@mail.ru.

Аль Зубайди Али Талиб Салих – магистр 2-го курса кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Thermal calculation of boilers. Regulatory method. SPb.: NGOS CC T., 1998. 256 p.
2. Devisilov V.A., Drozdova T.I., Timofeeva S.S. The theory of combustion and explosion: a textbook for high schools. M.: FORUM, 2012. 352 p.
3. Taymarov M.A., Dodov I.R., Stepanova T.O. Combustion of waste gases for heating in petrochemicals // Bulletin of Kazan Technological University. 2015, Vol.18, Vol. 24 P. 95–98
4. Taimarov M.A., Sadykov R.A., Tchaikovsky V.G. Measurement of temperatures and falling flows in the furnace of the TG-104 boiler at Surgutskaya GRES-1 // Bulletin of Machine Building. 2016. No. 2. P. 36–38.

5. Ahrenfeldt J., Thomsen T.P., Henriksen U., Clausen L.R. Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives // *Applied Thermal Engineering*. 2013. No. 50. P. 1407–1417.

6. Taymarov M.A. Practical training at the thermal power station. Kazan: Kazan, the state. Power. Univ-t. 2003. 64 p.

7. Taymarov M.A., Akhmetova R.V. Gas oil burners: a textbook. Kazan: Publishing house of "IPC "Brig", 2016. 80 p.

8. Trembovlya V.I. Thermotechnical testing of boiler plants. Moscow: Energia, 1977. 297 p.

9. Taymarov M.A. Laboratory workshop on the course "Boiler installations and steam generators". Kazan: Kazan State Power Univ., 2004. 107 p.

10. Tanatarov M.A., Akhmetshina M.N., Fashutdinov R.A. Technological calculations of oil processing plants. M.: Chemistry, 1987. 352 p.

11. Gelderen L., Malmquist L.M.V., Jomaas G. Vaporization order and burning efficiency. 2017. P. 558–537. 12. Abryutin A.A. Features of heat exchange in the furnace of a powerful fuel oil boiler with a burner arrangement. *Electric stations*. 1981. No. 9. P. 27–30.

12. Abryutin A.A. Osobennosti teploobmena v topke moshchnogo mazutnogo kotloagregata s podovoi komponovkoi gorelok. *Elektricheskie stantsii*. 1981. No. 9. P. 27–30.

Authors of the publication

Mikhail A. Taymarov – Dr. Sci. (Techn.), professor, Department "Energy engineering", Kazan state power engineering university.

Elena A. Saltanaeva – senior lecturer, Department of Informatics and control systems, Kazan state power engineering university.

Rimma V. Akhmetova – senior lecturer, Department of "Electric Stations", Kazan state power engineering university.

Rais G. Sungatullin – senior lecturer, Power Supply companies and energy-saving technologies, Kazan state power engineering university.

Al-Zubaidi Ali Talib Saleh – Master of the 2nd year of the department "Energy engineering", Kazan state power engineering university.

Поступила в редакцию

02 июня 2017 г.

УДК: 621.314.212; 621.315.615.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И МАРКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ ПО ИХ ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ

М.Ш. Гарифуллин¹, Р.А. Гиниатуллин², В.К. Козлов¹, Р.Л. Резатдинов¹, Г.И. Ризванова¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

Резюме: Проведен анализ оптических спектров пропускания минеральных трансформаторных масел в диапазоне 300–1000 нм. Показано влияние на спектр пропускания трансформаторных масел технологии их производства, а также используемого при производстве нефтяного сырья. Разработан алгоритм определения марки трансформаторного масла по его спектру пропускания.

Ключевые слова: минеральное трансформаторное масло, оптическая спектроскопия, марка масла, технология производства масла.

DETERMINATION OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURE AND MARK OF MINERAL TRANSFORMER OILS BY THEIR OPTICAL SPECTRA

M.Sh. Garifullin¹, R.A. Giniatullin², V.K. Kozlov¹, R.L. Rezatdinov¹, G.I. Rizvanova¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract: Conducted analysis of optical transmission spectra mineral transformer oils in the range of 300 - 1000 nm. Showing influence at optical transmission spectrum of transformer oils technologies of their production, as well as used in the production of petroleum raw materials. The algorithm is developed determination of the oil grade according to its transmission spectrum.

Keywords: transformer oil, optical spectroscopy, oil grade, manufacturing technology of mineral oil.

Введение

В современных условиях основным видом жидкой изоляции маслonaполненных силовых трансформаторов является минеральное трансформаторное масло, изготавливаемое из соответствующей нефтяной фракции [1]. При этом используется различная технология производства, а также нефтяное сырье различного происхождения.

Для различного типа, а также класса напряжения маслonaполненного электрооборудования используются масла различных марок. При этом на практике встречаются ситуации, когда неизвестно какой тип масла использован в том или ином оборудовании, либо неизвестно происхождение и качество масла от поставщика. Например, масло марки ТКп было снято с производства Ярославским НПЗ в 2010 году, однако, в связи имеющимся спросом, было возобновлено производство этого масла по ТЦ ТУ 0253-002-72868394-2013 [2]. При этом стандартными методами, согласно РД 34.45-51.300-97, потребители не в силах оценить соответствие этого масла выпускавшемуся ранее.

В данной работе изложена методика экспресс-анализа оптических спектров пропускания трансформаторных масел на примере марок ГК, ВГ, *Nytro*, Т-1500 и ТКп, позволяющая определять технологию производства масел, а также идентифицировать их марку. Изложенные принципы могут быть использованы для анализа оптических спектров любых видов минеральных масел.

Методика исследования

Для получения спектров пропускания использовался спектрофотометр СФ-56. Длина оптического пути (толщина кюветы) составляла 50 мм, ширина щели 1 нм. Спектры пропускания записывались со спектральным разрешением 1 нм.

Основные результаты

На рис. 1 показаны нормированные спектры пропускания масел марок ГК, ВГ, *Nytro*, Т-1500 и ТКп. Подробный анализ влияния химического состава трансформаторных масел на их оптические спектры пропускания в диапазоне 300–1000 нм дан в работе [2]. В частности, было показано, что положение коротковолновой границы спектров пропускания $\tau(\lambda)$ зависит от концентрации в масле полиароматических соединений.

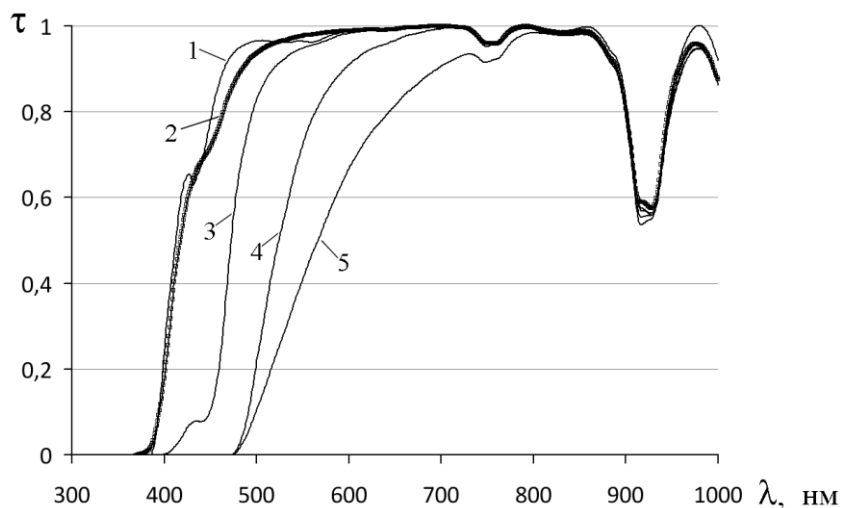


Рис. 1. Нормированные спектры пропускания $\tau(\lambda)$ различных масел
Марки масел: 1 – *Nytro*; 2 – ВГ; 3 – ГК; 4 – Т-1500; 5 – ТКп

У трансформаторных масел ГК, ВГ и *Nytro* при толщине слоя масла 50 мм коротковолновая граница спектра пропускания начинается с длин волн 370–400 нм. Указанные масла производятся по современной технологии гидрокрекинга, что обуславливает низкое содержание полиароматических, а также смолисто-асфальтеновых веществ. Граница спектров пропускания масел, производимых по другим технологиям, смещена относительно спектров рассматриваемой группы.

Первичная идентификация конкретной марки из этих трех масел основывается на анализе положения и интенсивности полос поглощения сложных ароматических молекул, присутствующих в составе масел. Так, для масла ГК характерно наличие в спектре пропускания характерного провала в районе 435 нм, который был отнесен нами к полосе поглощения перилена, содержащегося в масле ГК, производимого из Западно-сибирских нефтей. Кроме того, в рассматриваемой группе у ГК граница пропускания больше остальных сдвинута в длинноволновую область, располагаясь около 400 нм. У масел ВГ и *Nytro* спектр пропускания начинается с 370 нм. Кривые $\tau(\lambda)$ у ВГ и *Nytro* в коротковолновой области имеют свои характерные особенности, обусловленные различием состава ароматической фракции,

что позволяет идентифицировать эти масла. Однако, как будет показано далее, для этой цели удобнее проводить анализ полос поглощения в районе 900–950 нм.

Еще одна технология, широко используемая для производства трансформаторных масел, заключается в селективной очистке масляного дистиллята различными растворителями. По этой технологии производится трансформаторное масло марки Т-1500 (Т-1500У). При этом степень извлечения из дистиллята смолисто-асфальтеновых и полиароматических соединений хуже, нежели при гидрокрекинге, что приводит к снижению коэффициента пропускания в коротковолновой области спектра. В результате этого, по сравнению с маслами предыдущей группы, граница спектра пропускания масла Т-1500 смещается в длинноволновую область (образец № 4 на рис. 1).

Еще более высоким содержанием полиароматических и смолисто-асфальтеновых веществ характеризуются минеральные масла, производимые с помощью технологии кислотно-щелочной очистки. Представителем данной технологии является трансформаторное масло ТКп. Граница спектра пропускания масла ТКп также сдвинута в длинноволновую область (образец № 5 на рис. 1). Характерным отличием от спектра масла марки Т-1500 является более пологий наклон кривой спектра пропускания $\tau(\lambda)$ в диапазоне 500–800 нм. Данная особенность обусловлена рассеянием излучения на дисперсной фазе (коллоидных частицах), которую в свежем масле формируют ассоциаты из асфальтеновых молекул [3]. По мере роста в масле окисленных соединений роль фактора рассеяния будет еще более выраженной [4; 5].

Таким образом, на основе анализа коротковолновой границы спектра пропускания трансформаторного масла можно определить использованную для его производства технологию – гидрокрекинг, селективная очистка или кислотно-щелочная очистка. Это сразу позволяет идентифицировать такие масла, как Т-1500 и ТКп. Из числа масел, производимых по технологии гидрокрекинга, как было показано, наиболее просто идентифицируется масло марки ГК.

Рассмотрим далее спектральный диапазон 900–950 нм, в котором проявляются ключевые отличия спектров пропускания масел ГК, ВГ и обусловленные отличием в их углеводородной основе. В рассматриваемой области спектра расположены полосы поглощения С-Н колебаний в метильных CH_3 -группах (913 нм), метиленовых CH_2 -группах нафтеновых молекул (924 нм), а также метиленовых CH_2 -группах парафиновых цепочек (932 нм). На рис. 2 показаны кривые $\tau(\lambda)$ масел ГК, ВГ и *Nytro* в спектральном диапазоне 850–1000 нм. Указанные полосы поглощения в данной области спектра перекрываются между собой, образуя интегральную полосу поглощения, имеющую явно выраженные два плеча. В зависимости от соотношения в масле нафтеновых и парафиновых соединений одно из плеч может быть более интенсивным. На рисунке они условно обозначены как «Нафтенy» (~920 нм) и «Парафины» (~930 нм).

Дадим интерпретацию представленных спектров пропускания. Масло *Nytro* производится из Венесуэльских нафтеновых нефтей [6], обуславливающих высокое содержание в этом масле нафтеновых молекул, что приводит к снижению коэффициента пропускания в районе 915–925 нм (пик «Нафтенy»). Пик «Парафины» в масле *Nytro* имеет меньшую относительную интенсивность.

Масло ГК производится из западно-сибирских парафинистых нефтей, поэтому в спектре пропускания этого масла более интенсивной является полоса поглощения, относящаяся к парафиновым молекулам (пик «Парафины»).

По соотношению интенсивностей пиков «Нафтенy» и «Парафины» масло ВГ занимает промежуточное положение между *Nytro* и ГК. Используя принцип относительной интенсивности пиков нафтеновых и парафиновых углеводородов, можно идентифицировать конкретную марку масла. Данная методика может быть использована и для других трансформаторных масел, не рассмотренных в данной статье.

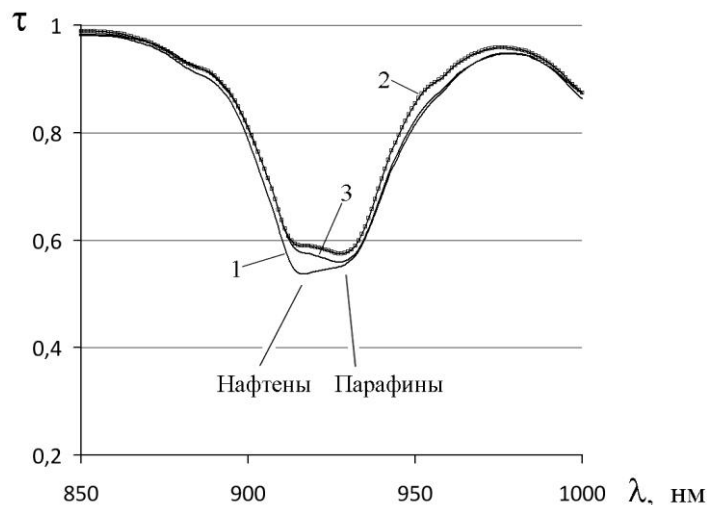


Рис. 2. Влияние структурно-группового состава масел на их спектры пропускания
Марки масел: 1 – Nytro; 2 – ВГ; 3 – ГК

Следует отметить, что для разделения и последующего анализа перекрывающихся полос поглощения в области 900–950 нм можно использовать математическую процедуру двукратного дифференцирования кривой $\tau(\lambda)$ либо кривой оптической плотности $D(\lambda)$ [7; 8].

Таким образом, на примере 5 марок трансформаторных масел продемонстрирована возможность определения технологии производства, а также марки масел на основе анализа их оптических спектров пропускания в диапазоне 300–1000 нм. По сравнению с лабораторной методикой идентификации масел путем исследования их спектров в ИК диапазоне, согласно ASTM D 2144 [9] предлагаемые оптические исследования могут проводиться в виде экспресс-анализа с помощью малогабаритных спектрометров с ПЗС фотоприемниками [10].

Выводы

Анализ спектра пропускания минерального трансформаторного масла в диапазоне 300–1000 нм позволяет оценить содержание в масле полиароматических и смолисто-асфальтеновых веществ, а также соотношение нафтеновых и парафиновых углеводородов в масле.

Основываясь на данных спектрального анализа можно определить технологию производства, а также марку трансформаторного масла.

Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Особенности оптических характеристик трансформаторных масел различных марок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 11–19.
3. Mullins O.C. The Modified Yen Model. Energy & Fuels. 2010, 24 (4). P. 2179–2207
4. Шкаликов А.В., Юшкова Е.А., Гафиятуллин Л.Г., Осин Ю.Н., Туранова О.А., Козлов В.К., Туранов А.Н. О рассеянии света в трансформаторном масле // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110, № 5. С. 768–772.
5. Гарифуллин М.Ш. Использование методов оптической спектроскопии для диагностики минеральных изоляционных масел // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 3299–3304.
6. Липштейн Р.А., Глазунова Т.В., Довгополый Е.Е. Шведские трансформаторные масла фирмы “Nynas” марок Nitro 11GX и Nytro 10X // Электрические станции. 1998. № 1. С. 61–64.
7. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Определение концентрации ионола и кислотного числа в трансформаторных маслах спектральным методом // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. № 5–6. С. 85–96.

8. Гарифуллин М.Ш. Диагностические исследования изоляционных масел различными методами оптической спектроскопии // Энергетика Татарстана. 2013. № 1. С. 53–59.

9. ASTM D 2144. Standard Test Methods for Examination of Electrical Insulating Oils by Infrared Absorption.

10. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Прибор для спектральных исследований изоляционных масел в диапазоне 600–1100 нм. // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. № 9–10. С. 114–116.

Авторы публикации

Гарифуллин Марсель Шарифьянович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гиниатуллин Руслан Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и электротехника» (ЭЭ) Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Резатдинов Равиль Ленарович – магистрант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ризванова Гульназ Ильдусовна – магистрант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. Transformer oil. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 296 p.
2. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Features of optical characteristics of transformer oils of various grades. Proceedings of the higher educational institutions // ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2015. No. 11–12. P. 11–19.
3. Mullins O.C. The Modified Yen Model. Energy & Fuels. 2010, 24 (4). P. 2179–2207.
4. Shkalikov A.V., Gafiyatullin L.G., Osin Yu.N., Turanova O.A., Turanov A.N., Yushkova E.A., Kozlov V.K. On light scattering in transformer oil // Optics and Spectroscopy. 2011. Vol. 110, No. 5. P. 768–772.
5. Garifullin M.S. Use of methods optical spectroscopy for diagnosis of mineral insulating oils // Fundamental Research. 2013. No. 10. P. 3299–3304.
6. Lipshteyn R.A., Glazunov T.V., Dovgopolyi E.E. Swedish transformer oils company «Nynas» brands Nitro 11GX and Nytro 10X // Electric stations. 1998. No. 1. P. 61–64.
7. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Determination of the concentration of ionol and acid number in transformer oils by the spectral method. Proceedings of the higher educational institutions // ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2001. No. 5–6. P. 85–96.
8. Garifullin M.S. Diagnostic studies of insulating oils by various methods of optical spectroscopy // Power engineering of Tatarstan. 2013. No. 1. P. 53–59.
9. ASTM D 2144. Standard Test Methods for Examination of Electrical Insulating Oils by Infrared Absorption.
10. Kozlov VK, Garifullin M.Sh. Instrument for spectral studies of insulating oils in the range 600–1100 nm. // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2001. No. 9–10. P. 114–116.

Authors of the publication

Marsel Sh. Garifullin – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Ruslan A. Ganiatullin – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of “Electric Drive and Electrical Engineering”, Kazan National Research Technological University.

Vladimir K. Kozlov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Ravil L. Rezatdinov – Student of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Gulnaz I. Rizvanova – Student of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

13 июля 2017 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В СЕТИ 10/0,4 КВ
С СИЛОВЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ
НЕСИММЕТРИЧНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ**

А.И. Антонов

Омский институт водного транспорта, г. Омск, Россия

Резюме: В статье приводятся результаты исследований уровней электромагнитных помех по коэффициентам несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10/0,4 кВ с несимметричной резко переменной нагрузкой при силовых трансформаторах различной мощности.

Ключевые слова: несимметрия напряжения, силовые трансформаторы, электромагнитная помеха, качество электрической энергии, несимметричный характер нагрузки, программный продукт.

**STUDY OF THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN A NETWORK
WITH POWER TRANSFORMERS OF VARIOUS CAPACITIES UNDER ASYMMETRIC
NATURE OF THE LOAD**

A.I. Antonov

Omsk Institute of Water Transport, Omsk, Russia

Abstract: In the article results of researches of levels of electromagnetic disturbances on the unbalance voltage factors on the reverse sequence in a 10 / 0.4 kV network with asymmetric sharply variable load are presented with power transformers of different power.

Keywords: asymmetry of voltage, power transformers, electromagnetic interference, power quality, unbalanced nature of the load, a software product.

Одним из видов искажения электрической сети является несимметрия трехфазной системы напряжений, основная причина которой – различные условия работы фаз. Несимметричные режимы возникают по разным причинам, таким как неполнофазные режимы работы элементов электрической сети, например, при пофазном отключении линий и трансформаторов для ремонта (продольная несимметрия) или наличие значительных несимметричных нагрузок по фазам (поперечная несимметрия) [1].

Несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , который рассчитывается по формуле [2]

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{\left(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2 \right)^2} \cos^{-1} \theta$, в свою очередь U_{ijfund} – основная составляющая

напряжения между фазами i и j .

ГОСТ 32144-2013 характеризует коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности как кондуктивную низкочастотную электромагнитную помеху (ЭМП), соответствующую определённому уровню электромагнитной совместимости (ЭМС). При этом установлены следующие уровни ЭМС электрических сетей общего назначения для кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности: значения данного показателя КЭ в точке передачи электрической энергии, усреднённые в интервале 10 мин., не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала и 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю [2].

Наш объект, на котором проводились необходимые исследования, связан с литейным производством на промышленном предприятии. Литейный участок на этом предприятии, в котором литейные установки конструктивно подключаются на 2 фазы, является источником кондуктивных низкочастотных ЭМП в сети 10/0,4 кВ и вызывает при этом поперечную несимметрию.

Для начала разработана математическая модель объекта исследования, графическая интерпретация которой показана на рис. 1. Данный объект состоит из источника питания напряжением 10 кВ, силового понижающего трансформатора ТМЗ 1000-10/0,4, четырех линейных трансформаторов ОЭСК 250/40, четырех установок электрошлакового литья с дуговым способом нагрева, работающих при напряжении 40 В, каждая мощностью 170 кВ·А [3].

Модель разработана в прикладном пакете *Simulink* программы *Matlab*. Данная модель характеризуется поперечной несимметрией напряжения.

После разработки данной модели необходимо убедиться в ее адекватности. Так как источником кондуктивной низкочастотной ЭМП является литейный участок, в состав которого входят 4 нагрузки, каждая мощностью 170 кВ·А, то при уменьшении этой мощности значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности должны также уменьшаться. Чтобы убедиться в верности данного суждения, мы уменьшали мощности нагрузок от 190 до 30 кВ·А с шагом 20 кВ·А. При этом на каждом шаге мощности всех 4-х нагрузок были одинаковы. Для каждого шага получены значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} для сетей 10 и 0,4 кВ. С помощью формулы (1) вычислены значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} . Результаты, полученные с помощью модели и вычисленные с помощью формулы (1), представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов несимметрии напряжения при уменьшающейся мощности нагрузки

Мощность нагрузки, кВт	10 кВ				0,4 кВ			
	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	K_{2U}	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	K_{2U}
190	9521	9939	9453	2,5	360,1	388,9	354	4,7
170	9568	9965	9534	2,3	364	391	359,6	4,2
150	9629	9990	9598	2	368,4	393,2	364,7	3,8
130	9683	10010	9667	1,8	372,6	395	369,9	3,3
110	9736	10020	9732	1,5	376,9	396,5	375	2,8
90	9789	10030	9793	1,3	381,1	397,7	379,9	2,4
70	9841	10035	9850	1	385,3	398,7	384,6	1,9
50	9892	10040	9901	0,76	389,5	399,4	389,1	1,4
30	9941	10040	9946	0,5	393,7	399,7	393,3	0,82

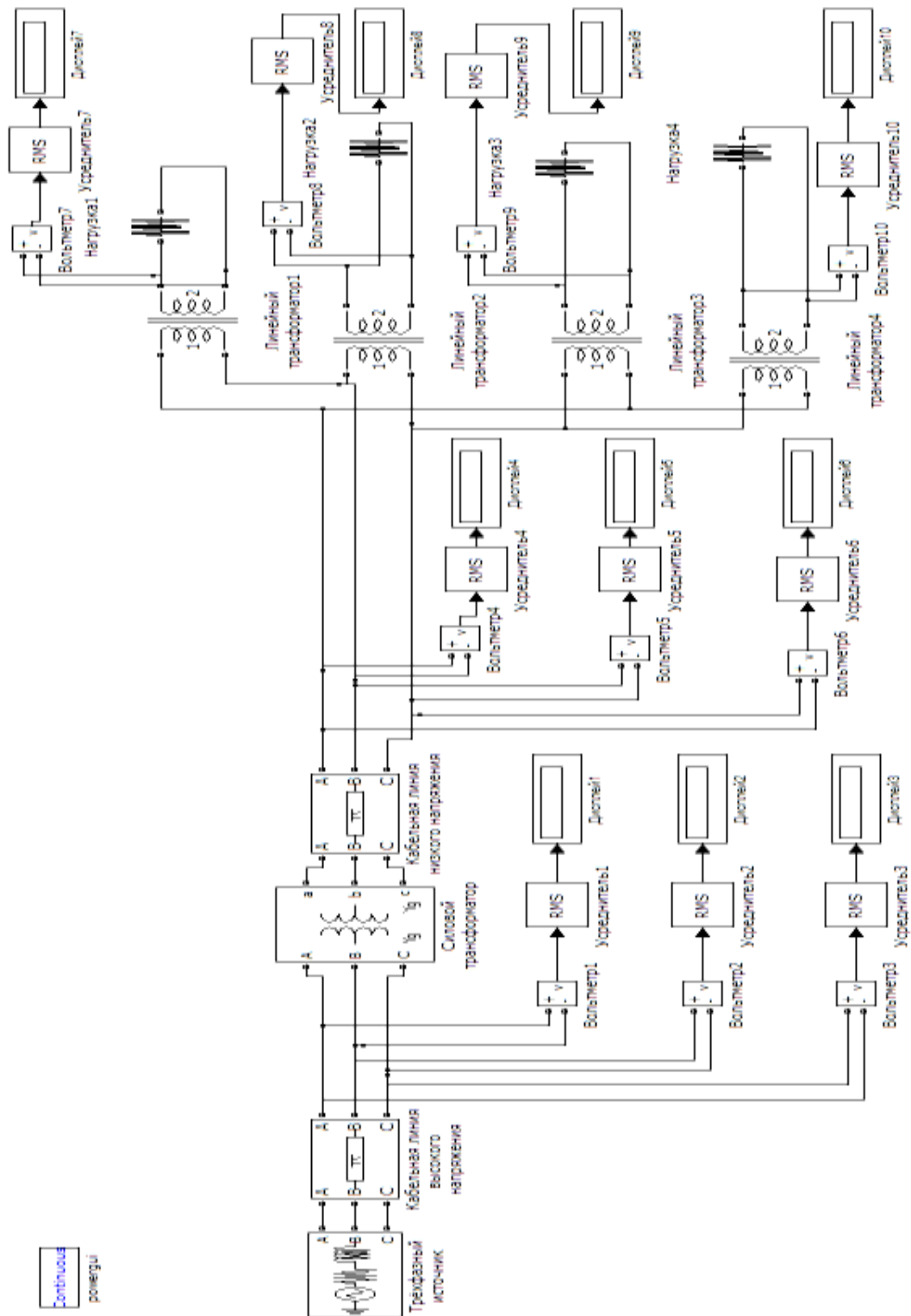


Рис. 1. Графическая интерпретация математической модели литейного участка

Для наглядности полученных результатов построен график зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности для высокого и низкого напряжения от мощности нагрузки (рис. 2), из которого видно, что при уменьшении мощности нагрузки уменьшаются значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности как в сети 0,4 кВ, так и в сети 10 кВ. При определенных значениях мощностей нагрузки значения данных коэффициентов становятся ниже предельно допустимых (4%) и нормально допустимых (2%) значений. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что действительно нагрузки определенной мощности являются источником кондуктивной низкочастотной ЭМП.

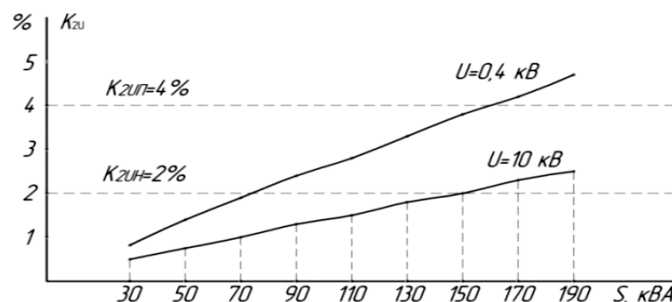


Рис. 2. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности для высокого и низкого напряжения от мощности нагрузки

Данный вывод позволяет нам продолжить исследования уровня ЭМП при несимметричном характере нагрузки. Так как нагрузка имеет не только несимметричный, но и резкопеременный характер, то для выявления отклонения качества электроэнергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности на данном объекте использовался генератор случайных чисел, изменяющий значения мощностей каждой нагрузки на литейном участке случайным образом от 140 до 200 кВ·А 20 раз. Для каждого из 20-ти вариантов значений мощностей нагрузки с помощью модели получили свои значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} . Пользуясь формулой (1), вычислены значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} .

На объекте исследования используется силовой трансформатор мощностью 1000 кВ·А. Данные исследования проводились при силовых трансформаторах различной мощности, то есть кроме силового трансформатора 1000 кВ·А в модель поочередно вводились силовые трансформаторы мощностью 630, 1600 и 2500 кВ·А. В модели для каждого из силовых трансформаторов получены те же параметры, что и при силовом трансформаторе 1000 кВ·А.

После получения значений K_{2U} , необходимо их обработать. Обработка полученных значений проводилась с помощью программного продукта «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности», благодаря которому рассчитаны параметры закона распределения исследуемой величины, а также определены вероятности появления кондуктивной электромагнитной помехи за расчетный период. Программный продукт разработан в среде разработки Lab VIEW [4]. На данный программный продукт получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661752 от 20 октября 2016 г.

LabVIEW — интегрированная графическая среда разработчика для создания интерактивных программ сбора, обработки данных и управления периферийными устройствами. Программирование осуществляется на уровне функциональных блок-схем

(блок-диаграмм) с использованием графического языка G. В состав библиотеки программы входит подпалитра математических функций (*Mathematics*). Программный продукт, разработанный средствами *LabVIEW*, позволяет создавать пользователю удобный интерфейс, получить все необходимые значения для оценки результатов измерений показателей качества электрической энергии.

Для проведения статистической обработки данных, полученных с помощью модели в ходе исследований, в программном продукте предлагается сначала экспортировать данные измерений в документ *Microsoft EXCEL*. После этого следует сохранить полученные данные как текстовые файлы (с разделителями табуляции), и данный сохраненный файл необходимо прикрепить в программу в разделе «Ввод данных». В программном продукте уже заложены пределы нормально допустимых и предельно допустимых значений K_{2U} согласно ГОСТ 32144-2013. После запуска в течение нескольких долей секунд программный продукт рассчитывает параметры распределения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности, такие как максимальное и минимальное значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности, математическое ожидание коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности и среднеквадратичное отклонение. Интерфейс программного продукта по обработке результатов исследований показателей качества электрической энергии показан на рис. 3–10.

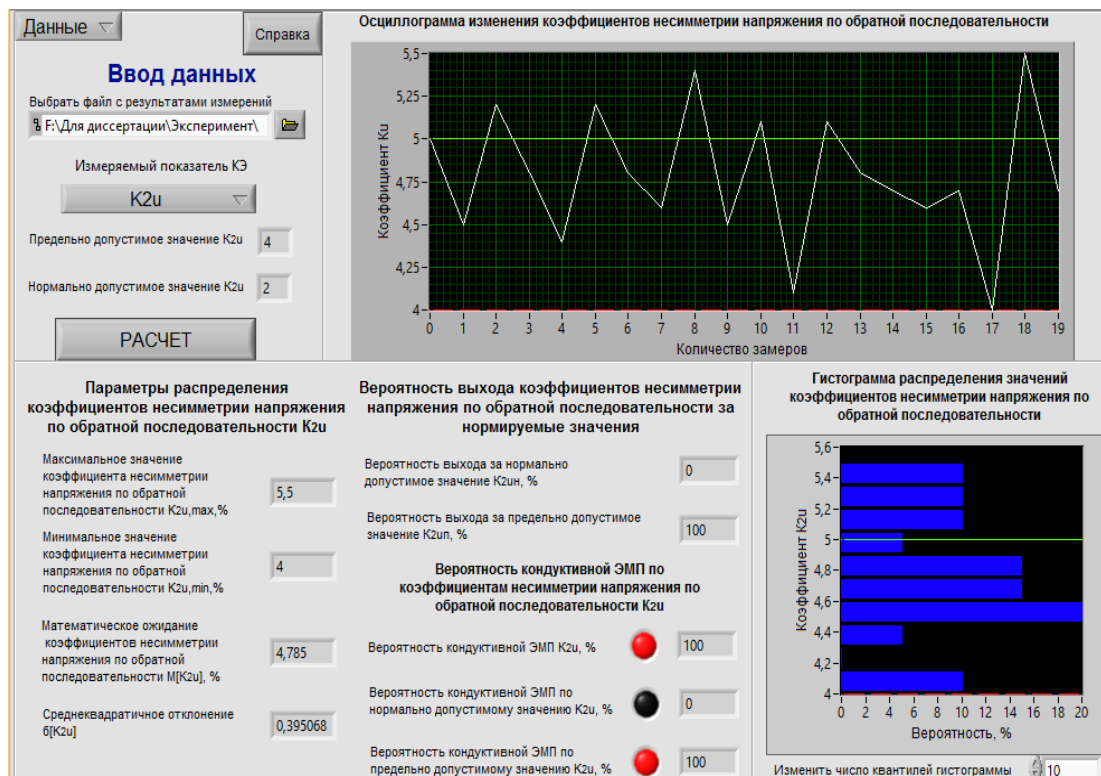


Рис. 3. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 630 кВ·А

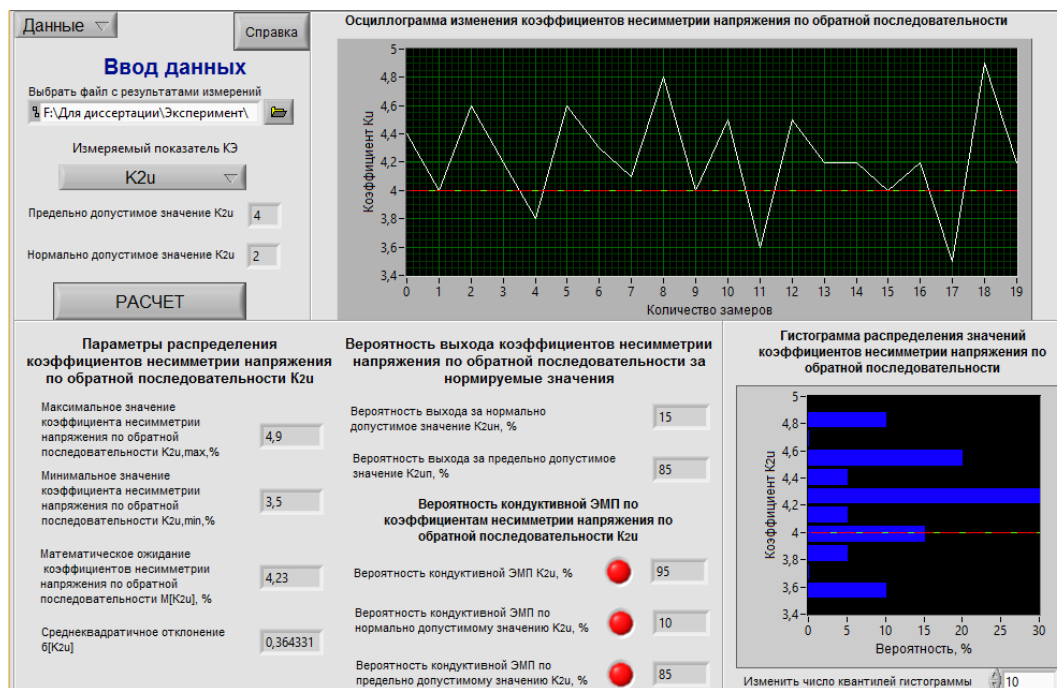


Рис. 4. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 1000 кВ·А

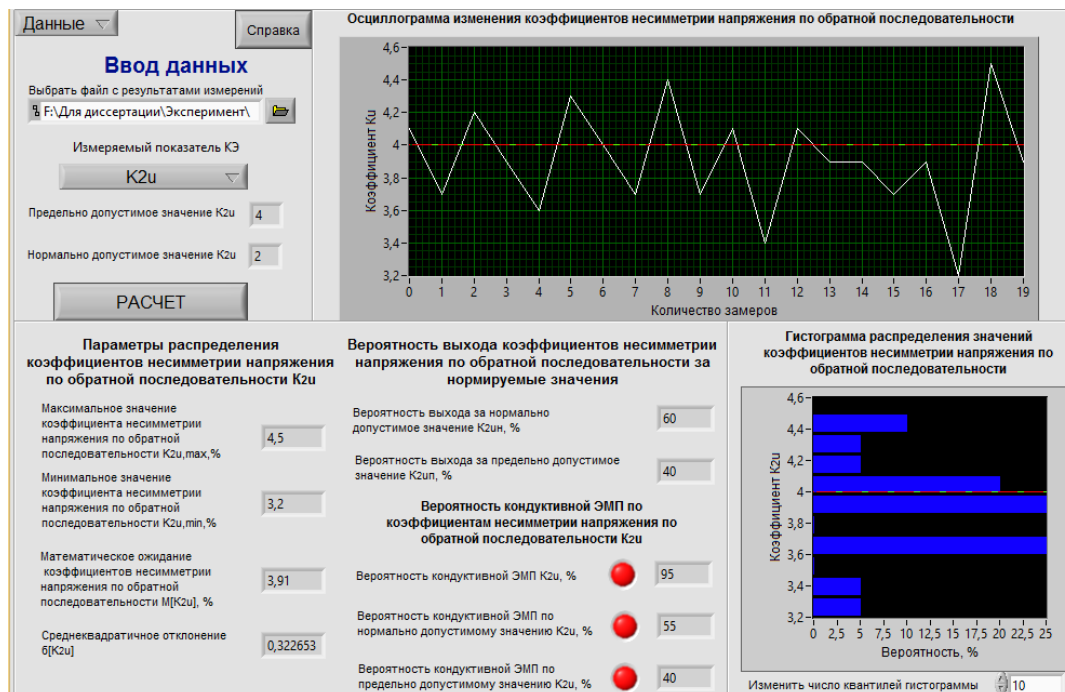


Рис. 5. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 1600 кВ·А

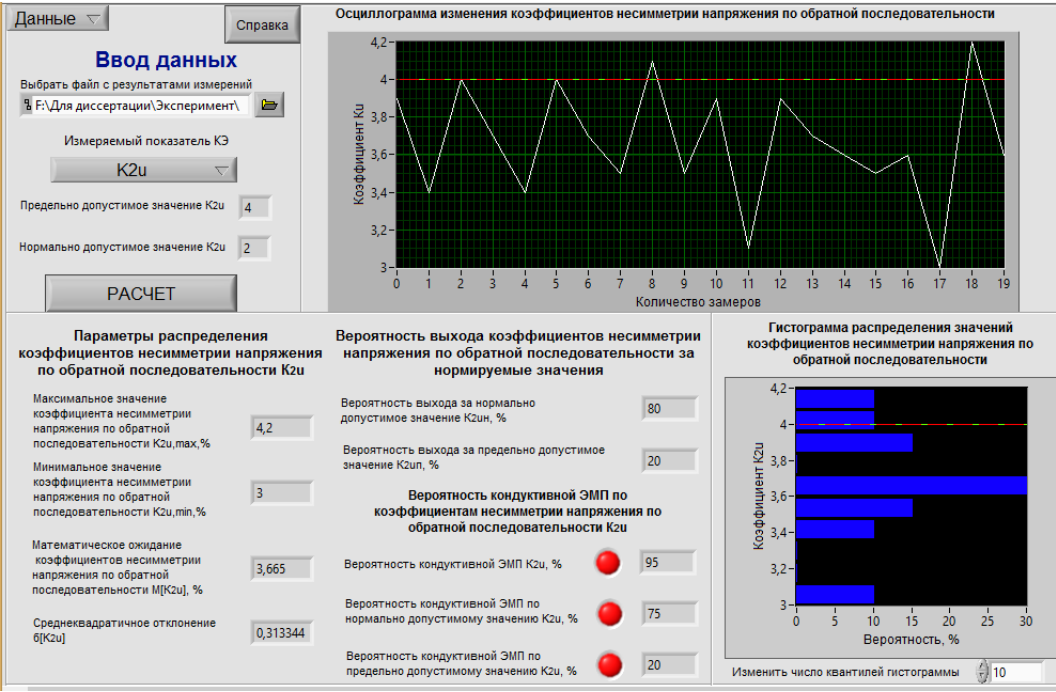


Рис. 6. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 2500 кВ·А

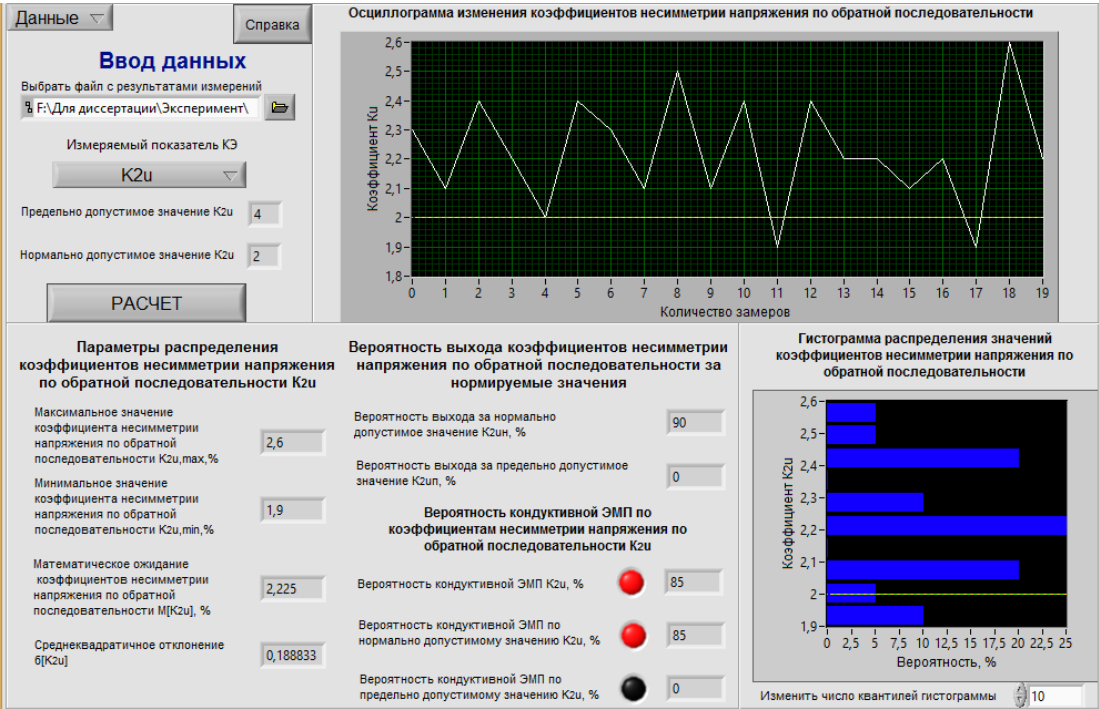


Рис. 7. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 630 кВ·А

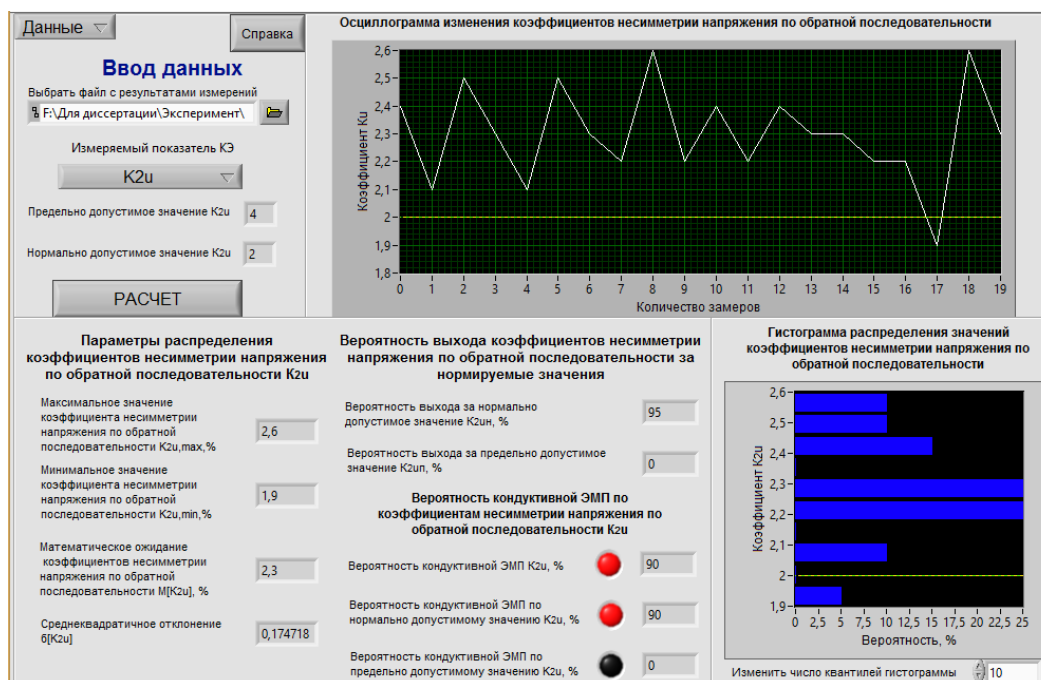


Рис. 8. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 1000кВ·А

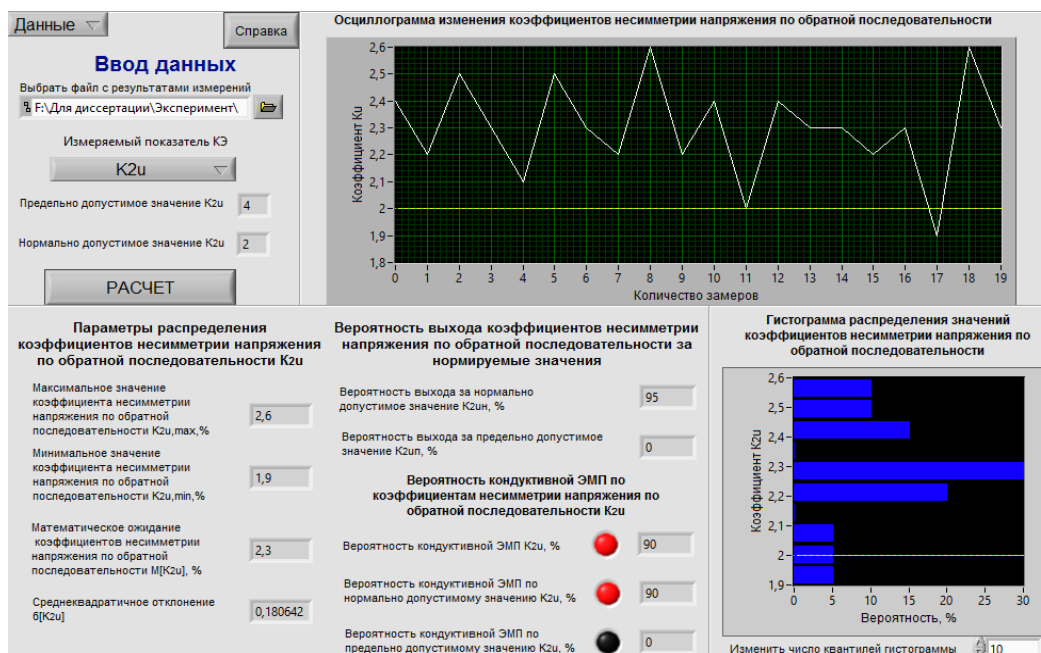


Рис. 9. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 1600 кВ·А

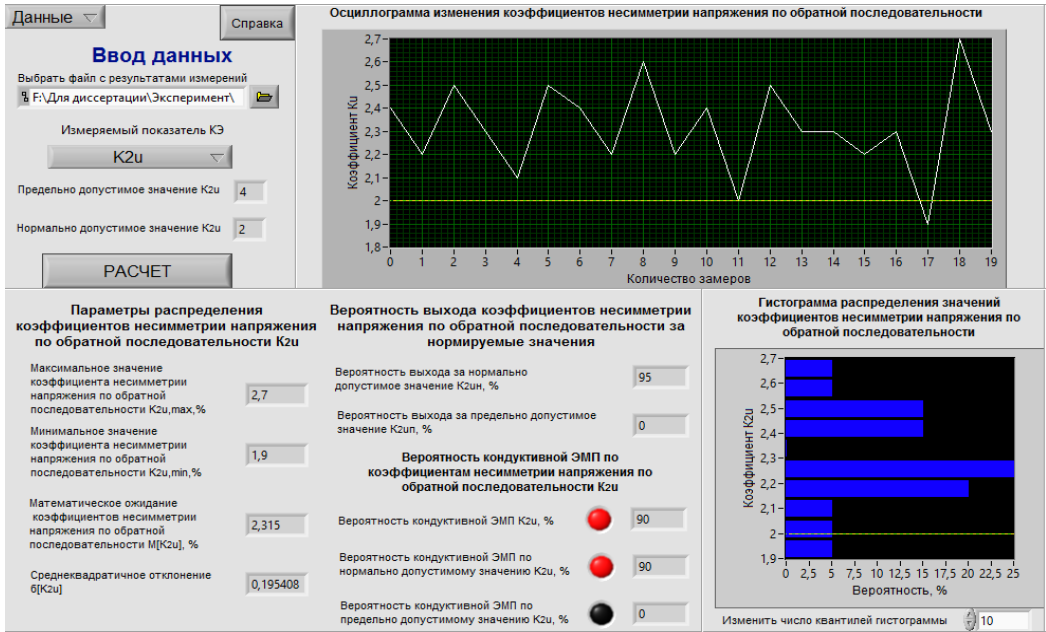


Рис. 10. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 2500 кВ·А

Для наилучшего восприятия сравнительного анализа значений параметров распределения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности все полученные значения для сетей 10/0,4 кВ при разных мощностях силового трансформатора сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров распределения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности сети 10/0,4 кВ при различных мощностях силового трансформатора

№ п/п	Параметры	Сеть 0,4 кВ Мощность силового трансформатора, кВ·А				Сеть 10 кВ Мощность силового трансформатора, кВ·А			
		630	1000	1600	2500	630	1000	1600	2500
1	Максимальное значение K_{2Umax} , %	5,5	4,9	4,5	4,2	2,6	2,6	2,6	2,7
2	Минимальное значение K_{2Umin} , %	4	3,5	3,2	3	1,9	1,9	1,9	1,9
3	Математическое ожидание $M[K_{2U}]$, %	4,785	4,23	3,91	3,665	2,225	2,3	2,3	2,315
4	Среднеквадратичное отклонение $\delta[K_{2U}]$, %	0,395	0,364	0,323	0,313	0,189	1,174	0,181	0,195
5	Вероятность выхода за нормально допустимое значение K_{2UN} , %	0	15	60	80	90	95	95	95
6	Вероятность выхода за предельно допустимое значение K_{2UL} , %	100	85	40	20	0	0	0	0

Продолжение таблицы 2

7	Вероятность кондуктивной ЭМП по нормально допустимому значению K_{2U} , %	0	10	55	75	85	90	90	90
8	Вероятность кондуктивной ЭМП по предельно допустимому значению K_{2U} , %	100	85	40	20	0	0	0	0
9	Вероятность кондуктивной ЭМП K_{2U} , %	100	95	95	95	85	90	90	90

После обработки результатов исследования можно сделать следующие выводы:

– значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 0,4 кВ больше, чем в сети 10 кВ, что подтверждает теорию о критерии распределения в электроэнергетической системе кондуктивных ЭМП в смежную сеть, согласно которой помеха, переходящая из одной смежной сети в другую (в нашем случае от сети 0,4 в сеть 10 кВ), гасится в силовом трансформаторе на определенное значение коэффициента. Из таблицы видно, что в сети 10 кВ вероятность кондуктивной ЭМП по предельно допустимому значению K_{2U} равна 0, то есть ни одно из значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности не вышло за пределы 4%, тогда как в сети 0,4 кВ такая вероятность присутствует;

– значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 0,4 кВ уменьшаются с увеличением мощности силового трансформатора, а это влечет за собой уменьшение математического ожидания и среднеквадратичного отклонения, а следовательно и вероятности появления кондуктивной ЭМП. Это означает, что помеха в силовом трансформаторе большей мощности гасится на большее значение коэффициента. Увеличение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на низком напряжении при снижении мощности трансформатора можно объяснить тем, что мощность нагрузки растет относительно мощности силового трансформатора, и запас по мощности силового трансформатора уменьшается;

– значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10 кВ несколько уменьшаются, но это уменьшение происходит в меньшей степени, по сравнению с увеличением значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 0,4 кВ. Уменьшение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10 кВ при снижении мощности трансформатора можно объяснить тем, что мощность источника трехфазного напряжения относительно мощности трансформатора увеличивается и, соответственно, увеличивается запас по мощности этого источника.

Литература

- ГОСТ 30804.4.30. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электроэнергии. М.: Стандартинформ, 2014. 57 с.
- ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

3. Антонов А.И., Вишнягов М.Г., Денчик Ю.М., Зубанов Д.А., Клеутин В.И., Руппель А.А. Определение кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: СГУВТ. 2015. № 4. С. 199–203.

4. Зубанов Д.А., Клеутин В.И., Сидоренко А.А. и др. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы LabView: сборник научных трудов ОИВТ. 2012. № 10. С. 118–122.

5. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с.

6. Наумов И. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. Иркутск, 2001 г. 217 с.

7. Пат. СССР 801186, МКИ H02 J3/26. Устройство для симметрирования режима трехфазной сети / Налбандян Д.Б., Мельник Н.И. Опубл. 30.01.81. Бюл. № 4.

8. Вишнягов М.Г., Руппель А.А. и др. Электромагнитная совместимость в электрических сетях Прииртышья // Энергосистема: исследование свойств, управление, автоматизация: матер. междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 26–29 мая 2009 г. Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. Спецвыпуск. 2009. № 1. С. 223–227.

9. Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванов М.Н. Ситников Г.В. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. 559 с.

10. Park R.H. Two-Reaction theory of synchronous machines. General method of analysis. Trans. AIEE. Pt 1, 1929, V. 48. P. 716; Pt 2, 1933, V. 52. P. 352.

Автор публикации

Антонов Александр Игоревич – ст. преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта. E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru.

References

1. GOST 30804.4.30. Electric Energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Methods for measuring electricity quality. Moscow: Standardinform, 2014. 57 p.

2. GOST 32144-2013. Interstate standard. Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems. - In exchange for GOST 13109-97; Enter. 2014-07-01. Moscow: Standardinform, 2014. 20 p.

3. Antonov A.I. Determination of conductive low-frequency noise with respect to the voltage unbalance coefficient by the reverse sequence. A.I. Antonov, M.G. Vishnyagov, Yu.M. Dencik, D.A. Zubanov, V.I. Kleutin, A.A. Ruppel. Scientific Problems of Siberia and the Far East. Novosibirsk: SSUVT. 2015. No. 4. P. 199–203.

4. Zubanov D.A. Processing of the results of experimental studies of electrical energy quality indicators by means of the LabVieW program. D.A. Zubanov, V.I. Kleutin, A.A. Sidorenko et al. Collected scientific papers of the OIVT. 2012. 10. P. 118–122.

5. Suranov, A.Ya. LabVIEW 8.20: Reference book on functions. A.Ya. Suranov. Moscow: DMK Press, 2007. 536 p.

6. Naumov I. Optimization of asymmetric regimes of the system of rural power supply. Irkutsk, 2001 217 with.

7. Pat. USSR 801186, MКИ H02 J3 / 26. Device for balancing the three-phase network mode. Nalbandyan DB, Melnik N.I. Opubl. 30.01.81. Bul. No. 4.

8. Vishnyagov M.G. Electromagnetic Compatibility in Electrical Networks of Priirtyshia. M.G. Vishnyagov, A.A. Ruppel [and others]. Energy system: the study of properties, management, automation: mater. Intern. Scientific-techn. Conf. Novosibirsk, May 26-29, 2009. Scientific Secretary Probl. Transp. Sib. And Dahl. East. Special release. 2009. No. 1. P. 223–227.

9. Danilov G.A. Improving the quality of the operation of power transmission lines. G.A. Danilov, Yu.M. Denchik, M.N. Ivanov, G.V. Sitnikov, ed. V.P. Gorelov, V.G. Salnikova. Novosibirsk: Novosib. State. Acad. Aq. Trans., 2013. 559 p.

10. Park R.H. Two-Reaction theory of synchronous machines. General method of analysis // Trans. AIEE. Pt 1, 1929, V. 48. P. 716; Pt 2, 1933, Vol. 52. P. 352.

Author of the publication

Alexander I. Antonov – St. Lecturer of the Department "Electrical engineering and electrical equipment" Omsk Institute of Water Transport.

Поступила в редакцию

13 июня 2017 г.

УДК 621.311:621.316

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРАВИЛЬНОЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ В КУЗБАССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

*Ф.С. Непша, А.И. Глушкова, Д.Ю. Воробьева

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

*ORCID: orcid.org/0000-0002-7468-2548, nepshafs@gmail.com

Резюме: В статье приведена статистика ложных срабатываний устройств АЧР за 2012-2016 гг. Также представлен анализ типов устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР), эксплуатируемых в Кузбасской энергосистеме. В результате анализа установлено, что основной причиной ложного срабатывания АЧР является отсутствие блокировки по скорости снижения частоты или ее неправильная настройка. Для исключения ложного срабатывания АЧР при выбеге электродвигателей предложены организационные и технические мероприятия. Отмечено, что правильная настройка блокировки по скорости снижения частоты требует участия всех субъектов электроэнергетической системы (Системный оператор, сетевые организации, потребители). Выполнено сравнение имеющихся на рынке устройств АЧР по функционалу и наличию блокировок от ложных срабатываний. Также сформулированы научно-технические задачи, решение которых необходимо для исключения ложного срабатывания АЧР при выбеге электродвигателей.

Ключевые слова: автоматическая частотная разгрузка, блокировка от ложного срабатывания, снижение частоты, ложные срабатывания, выбег электродвигателей.

TO THE QUESTION OF PROVIDING THE CORRECT WORK OF DEVICES OF AUTOMATIC FREQUENCY DISCHARGE IN THE KUZBAS ENERGY SYSTEM

*F.S. Nepsha, A.I. Glushkova, D.Yu. Vorobyeva

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia

*ORCID: orcid.org/0000-0002-7468-2548, nepshafs@gmail.com

Abstract: The article presents the statistics of false alarms of automatic frequency unloading devices for 2012-2016. An analysis of the types of automatic frequency unloading devices operated in the Kuzbass power system is also presented. As a result of the analysis it was established that the main reason for the false triggering of the automatic frequency unloading is the absence of a lock in the speed of the frequency reduction or its incorrect setting. To prevent false triggering of the automatic frequency unloading in the event of run-out of the motor load, organizational and technical measures are proposed. It is noted that the correct setting of the blocking for the rate of frequency reduction requires the participation of all entities of the electric power system (System Operator, network organizations, consumers). Comparison of the existing devices by functional and the presence of locks from rate of change of frequency is made. Also, scientific and technical problems are formulated, the solution of which is necessary to prevent false triggering of the automatic frequency unloading when the electric motors run out.

Keywords: *automatic frequency unloading, blocking from false triggering, rate of change of frequency, false triggering, run-out of the motor load.*

Введение

Надежность энергосистемы определяется заданным уровнем частоты, где системы регулирования частоты и мощности поддерживают частоту до тех пор, пока в энергосистеме имеется вращающийся резерв активной мощности. Но отключение генераторов или подключение новых потребителей приводит к дефициту активной мощности, что влечет за собой снижение частоты в сети. Согласно ГОСТ 32144-2013 отклонение частоты на $\pm 0,2$ Гц является допустимым в синхронизированных системах электроснабжения, и в энергосистеме России уровень частоты соответствует нормативному уровню.

При возникновении дефицита мощности в системе происходит снижение частоты на 1–2 Гц, начинается необратимый процесс, при котором снижение частоты происходит до уровня возможного возникновения явления лавины частоты, что приводит к полному погашению дефицитной энергосистемы с остановом электростанций и отключением энергоснабжения всех потребителей. Поэтому частотные аварии с возникновением лавины частоты считаются наиболее тяжелыми по своим техническим и экономическим последствиям. Аварийное снижение частоты, вызванное внезапным дефицитом активной мощности, происходит очень быстро, дежурный персонал за это время не успевает принять мер для ликвидации аварийного режима. Вследствие этого в энергосистеме используются устройства автоматики, которые должны предотвратить последствия аварии в течение нескольких секунд. Автоматика действует таким образом, чтобы были введены все резервы активной мощности электростанций, загружая все вращающиеся агрегаты до предела с учетом допустимых кратковременных перегрузок.

При отсутствии вращающегося резерва одним из способов восстановления частоты в сети является отключение потребителей, что осуществляется с помощью специальных устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР), срабатывающих при опасном снижении частоты энергосистемы.

На территории Кемеровской области в период с января 2016 по июнь 2017 г. зафиксировано 10 случаев срабатывания устройств АЧР, при этом последствиями такой работы устройств стало отключение более 600 социально значимых объектов Кузбасса, перерыв в работе крупных металлургических и угледобывающих предприятий.

АЧР должна обеспечивать подъем частоты до значений, при которых энергосистема может длительно работать нормально, но к системе АЧР не предъявляется требование восстановления частоты до номинального уровня или исходного. Также АЧР не должна ложно срабатывать: при снижении частоты, вызванном короткими замыканиями; выбеге электродвигателей; замыкании на землю в цепях оперативного тока; при снятии, подаче напряжения оперативного тока, снижении напряжения оперативного тока или при перерывах питания; объединении цепей переменного напряжения и цепей оперативного постоянного тока; возникновении неисправностей в цепях напряжения и при перезагрузке устройства АЧР.

Предотвращение ложной работы устройств АЧР при синхронных качаниях или асинхронных режимах в энергосистемах обеспечивается:

- эффективным действием модулей выделения основной гармоники и подавления гармонических составляющих тока в конструкции реле частоты;
- правильной настройкой уставок частоты и времени срабатывания реле частоты.

Предотвращение ложной работы устройств АЧР-1 обеспечивается задержкой времени срабатывания (не ниже 0,25 с), а также блокировкой действия устройств АЧР-1 при выбеге электродвигателей.

Выбор уставок АЧР и ЧАПВ, состава используемых блокировок и их параметров в каждом конкретном случае должен определяться схемой электрической сети, расчетом электрических режимов, технологическими особенностями защищаемого оборудования и не противоречить нормативным требованиям, изложенным в стандарте [1].

Для предотвращения излишних срабатываний устройств АЧР их выдержка времени должна быть такой, чтобы они не успевали сработать, пока остаточное напряжение не снизится до 10–30% номинального, при котором реле частоты не будет срабатывать. Этим условиям в большинстве случаев удовлетворяют очереди АЧР-2, поэтому следует стремиться устанавливать на подстанциях, где возможен выбег электродвигателей и компенсаторов в паузах АПВ и АВР, устройства этой категории разгрузки. Однако поскольку подстанций, в состав нагрузки которых входят двигатели, большинство и, естественно, на них приходится устанавливать и очереди АЧР-1, то этим мероприятием исключить излишнее срабатывание АЧР во многих случаях не удастся. В практике эксплуатации для предотвращения излишних срабатываний АЧР в паузах АПВ и АВР, как правило, применяются специальные блокировки. Такой блокировкой может служить блокировка по скорости снижения частоты на шинах погашенной подстанции.

При большой скорости снижения частоты для предотвращения ложного срабатывания АЧР применяются два реле частоты. Второе реле частоты срабатывает вслед за первым до того, как замкнется контакт первого реле времени. Промежуточное второе реле своим контактом через еще не разомкнувшийся размыкающий контакт первого промежуточного реле подает «плюс» оперативного тока на правый зажим обмотки первого промежуточного реле, запрещая срабатывание этого реле после замыкания контакта первого реле времени.

Другим видом блокировки АЧР является схема с включением контакта блокирующего реле направления мощности. При установке такого вида блокировки АЧР напряжение на контакт реле частоты подается через контакт блокирующего реле направления мощности. Реле направления мощности, включенное в цепи трансформатора связи с энергосистемой, реагирует на направление активной мощности. В нормальном режиме подстанция потребляет активную мощность, контакт реле направления мощности замкнут и разрешает действие АЧР. После отключения подстанции от сети активная мощность по трансформатору проходить не будет или будет направлена в сторону шин высшего напряжения. При этом реле направления мощности разомкнет свой контакт и предотвратит ложное срабатывание АЧР.

Блокировка по такому принципу неэффективна, если по отключаемой линии или трансформатору питается несколько узлов нагрузки с синхронными двигателями.

Аналогичным образом могут быть выполнены и блокировки по другим факторам. Возможно выполнение блокировки АЧР по уровню частоты на соседней секции шин данной подстанции. Выполнение блокировки по такому принципу целесообразно там, где питание различных групп нагрузок осуществляется по различным линиям.

Вышеуказанные блокировки не обеспечивают правильную работу АЧР во всех случаях выбега электродвигателей. Самым совершенным видом блокировки от ложного срабатывания при выбеге электродвигателей является блокировка по скорости снижения частоты df/dt , реализация которой возможна только на современных микропроцессорных устройствах релейной защиты.

Учитывая, что неправильная работа АЧР чревата нарушением технологического процесса на предприятиях и значительными убытками, вопрос обеспечения правильной работы устройств АЧР является актуальным и требует решения.

Материал и методы исследования

В качестве материала для исследования использована следующая информация:

- график АЧР, ЧАПВ на объектах энергосистемы Кемеровской области на 2016–2017 гг.;
- сведения об устройствах АЧР, используемых в Кузбасской энергосистеме;

- сводные данные о неправильных действиях устройств АЧР, ЧАПВ за 2012–2016 гг. на территории Кемеровской области;
- сводные данные о неисправностях, выявленных в процессе эксплуатации устройств АЧР, ЧАПВ на территории Кемеровской области;
- инструкции по эксплуатации микропроцессорных устройств АЧР;
- научно-техническая литература, посвященная вопросам функционирования АЧР и ЧАПВ.

Вышеуказанная информация была подробно изучена и проанализирована авторами.

Результаты

Динамика неправильных действий устройств АЧР, ЧАПВ и выявленных неисправностей за период с 2012 по 2016 гг. показана на рис. 1.

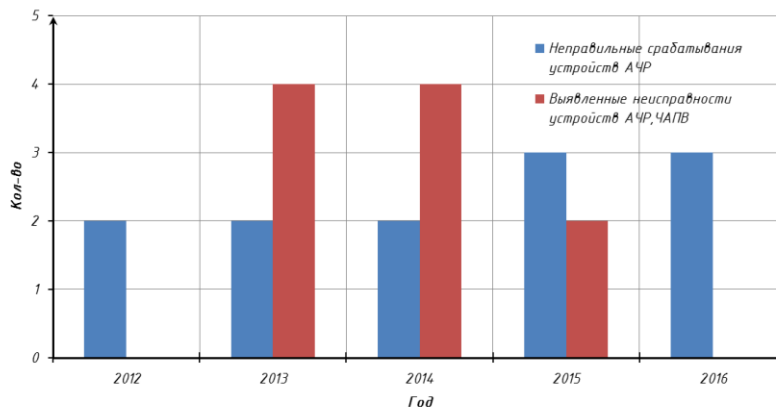


Рис. 1. Динамика неправильных действий устройств АЧР, ЧАПВ и выявленных неисправностей за 2012–2016 гг.

Количество неправильных срабатываний и неисправностей устройств АЧР, ЧАПВ незначительно и составляет не более 1% от общего количества устройств АЧР, используемых в Кузбасской энергосистеме. Тем не менее, неправильная работа АЧР приводит к недоотпуску электроэнергии и убыткам со стороны сетевой организации и потребителя. Для установления основной причины некорректной работы АЧР был выполнен анализ причин неправильных действий устройств АЧР, ЧАПВ за 2012–2016 гг. По результатам анализа выявлено, что основной причиной неправильной работы устройств АЧР является отсутствие блокировок от ложного срабатывания при выбеге электродвигателей (69%). Вторая по распространённости причина – ошибки при монтаже и неисправности в схеме (21%). Также наблюдалось ложное срабатывание устройств АЧР из-за наличия высших гармоник (8%).

Для определения оснащённости подстанций Кузбасской энергосистемы устройствами АЧР с блокировками при выбеге электродвигателей выполнен анализ устройств АЧР, эксплуатируемых на территории Кемеровской области (рис. 2).

Данные рис. 2 показывают, что около 69% устройств АЧР в Кузбасской энергосистеме представлены устаревшими индукционными реле (ИВЧ-3) и полупроводниковыми реле (РЧ-1, РСГ-11-50). У данных типов реле отсутствует возможность выполнения блокировки по скорости снижения частоты.

В связи с этим, а также значительным количеством промышленных предприятий в Кузбассе, проблема неправильной работы устройств АЧР является актуальной и требует решения. Однако, несмотря на актуальность, этой проблеме уделялось недостаточно внимания. Авторы считают, что решение этой проблемы необходимо и предлагают реализацию следующих мероприятий.

1. Пересмотр «Графика АЧР, ЧАПВ на объектах энергосистемы Кемеровской

области» с исключением присоединений со значительной долей двигательной нагрузки из-под АЧР-1 и включением ее в состав АЧР-2 несовмещенная. Указанное мероприятие позволит исключить неправильную работу устаревших устройств АЧР за счет значительной выдержки времени у АЧР-2 несовмещенная (5 с и более).

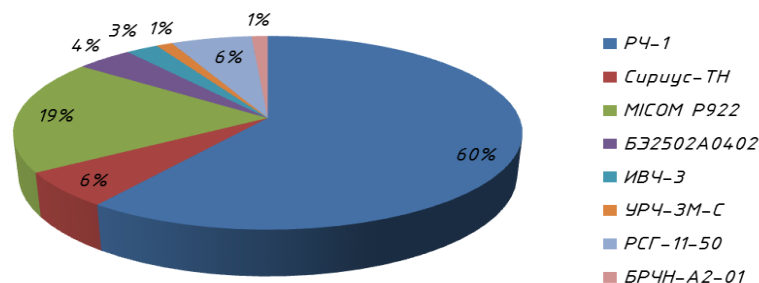


Рис. 2. Виды устройств АЧР, эксплуатируемых в Кузбасской энергосистеме

В настоящее время данное мероприятие выполнено. В процессе его реализации выявлено, что в энергорайонах со значительной долей двигательной нагрузки невозможно перенести все присоединения со значительной долей двигательной нагрузки из АЧР-1 в АЧР-2 несовмещенная. Отметим, что процент двигательной нагрузки не является объективным показателем, позволяющим судить о влиянии двигательной нагрузки на работу устройств АЧР.

2. Замена устаревших реле на новые микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ). Это мероприятие заключается в установке новых микропроцессорных устройств с наличием блокировки от ложного срабатывания при выбеге электродвигателей. Ввиду ограниченности инвестиционной программы сетевых организаций, целесообразно выполнить замену устройств АЧР подстанций, где невозможно исключить ложную работу АЧР путем выполнения мероприятия по п. 1.

3. Разработка методики корректного расчета уставок блокировки ложного срабатывания АЧР при выбеге электродвигателей.

В соответствии с п. 4.3. СТО [1], при реализации блокировки по скорости снижения частоты (df/dt), значение, при котором устройство АЧР блокируется, должно задаваться производителем устройства АЧР и составлять 10 Гц/с. Однако такое требование некорректно для двигательной нагрузки, в состав которой входят мощные синхронные двигатели. В таком случае скорость снижения частоты при выбеге электродвигателей может быть значительно меньше 10 Гц/с и, следовательно, может привести к неправильной работе АЧР. Отметим, что на современных терминалах микропроцессорной релейной защиты уставка df/dt может задаваться в диапазоне от 0 до 10 Гц/с с дискретностью 0,1 Гц [6–8]. Практически значение уставки должно определяться опытным или расчетным путем. Опытным путем определение уставки возможно в процессе эксплуатации. Поскольку устройство АЧР фиксирует скорость снижения частоты, возможно зафиксировать минимальное значение скорости снижения частоты и отстроить от него уставку df/dt . Тем не менее, необходимо несколько отключений, т.к. характер снижения частоты зависит от характера технологического процесса. На стадии проектирования возможно расчетное определение уставки df/dt . Однако для этого необходимы данные о составе двигательной нагрузки, конфигурации питаемой сети и механических характеристиках нагрузки на валу электродвигателей. Получение этих данных сопряжено со значительными организационными трудностями, т.к. задание на настройку устройств АЧР, ЧАПВ выдает Системный оператор, который в большинстве случаев не имеет

полного понимания о составе двигательной нагрузки в узлах энергосистемы. Поэтому уставка df/dt задается равной максимальному значению 10 Гц/с, что лишает собственников возможности выполнения других уставок и провоцирует ложную работу устройств АЧР.

Обсуждение

Для определения оптимального вида устройств АЧР выполнен анализ достоинств и недостатков каждого вида устройств АЧР, имеющихся на рынке МУРЗ. Результаты анализа представлены в таблице.

Таблица

Достоинства и недостатки различных видов устройств АЧР

№ п/п	Функции устройства	РЧ-1	Сириус-ТН	MiCOM P922	РСГ-11-50	БЭ2502 А0402
1	Автоматическое отключение определенных под частотную разгрузку присоединений	+	+	+	+	+
2	АПВ отключенных присоединений при повышении частоты	+ ¹	+	+	+ ¹	+
3	Одновременный контроль двух секций	—	+	—	—	—
4	Оперативный ввод блокировок в любые очереди АЧР и ЧАПВ	—	+	+	—	—
5	Сигнализация при пропадании напряжения с любого из каналов	+	+	+	+	+
6	Блокировка работы внешними релейными сигналами	—	+	+	—	+
7	АЧР до 4 групп присоединений	—	+	—	—	+
9	Возможность блокирования ступеней категории АЧР-I по скорости падения частоты и напряжения	—	+	+	—	+
10	Возможность блокирования ступеней АЧР от органа направления мощности	—	+	—	—	—
11	Стоимость устройств АЧР в 2017 г., руб.	5000-30000 ²	79414	86800	30252	65500
¹ — требуется дополнительный комплект реле;						
² — зависит от вида реализуемой блокировки						

Данные таблицы показывают, что устройства Сириус-ТН являются наилучшим вариантом для замены устаревших устройств АЧР, устройства MiCOM P922 и БЭ2502А0402 уступают ему по функционалу.

Тем не менее, замена устаревших устройств АЧР на МУРЗ не позволит полностью исключить ложного срабатывания АЧР без корректного выбора уставки блокировки по скорости снижения частоты. При этом методика выбора уставки блокировки по скорости снижения частоты отсутствует, а выбор уставки производится без учета характера двигательной нагрузки.

В связи с вышесказанным авторы считают целесообразным решение следующих научно-технических задач.

1. Научное обоснование и определение режима работы присоединений, при котором скорость снижения частоты минимальна в случае потери питания.

2. Установление влияния нагрузки разного состава двигательной нагрузки на скорость снижения частоты с целью разработки рекомендаций по выбору уставок блокировки df/dt на предприятиях различных отраслей промышленности.

3. Анализ работы блокировки df/dt и разработка рекомендаций по повышению ее

эффективности.

Отметим, что решение вышеуказанных задач требует непосредственного взаимодействия Системного оператора, сетевых организаций и потребителей.

Выводы

1. Установлено, что основной причиной ложного срабатывания устройств АЧР в Кузбасской энергосистеме является отсутствие блокировок от выбега электродвигателей или ее неправильная настройка.

2. Выявлено, что основная причина неисправностей устройств АЧР в Кузбасской энергосистеме в процессе эксплуатации – моральный и физический износ используемых компонентов (реле РЧ-1, РСГ-11-50).

3. Определено, что правильная настройка блокировки по скорости снижения частоты требует участия Системного оператора, сетевых организаций и потребителей.

4. По итогам анализа определено, что из рассмотренных МУРЗ наилучшим вариантом для замены устаревших устройств АЧР является Сириус-ТН. Тем не менее, без корректного выбора уставки df/dt применение МУРЗ не позволит полностью исключить ложное срабатывание АЧР

5. Определены научно-технические задачи, решение которых позволит исключить ложную работу устройств АЧР.

Литература

1. СТО 59012820.29.020.003-2016. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Микропроцессорные устройства автоматической частотной разгрузки. Нормы и требования. Стандарт АО «СО ЕЭС». Введ. 2016-08-16. М., 2016. 19 с.

2. Рабинович Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.

3. Беркович М.А., Комаров А.Н., Семенов В.А. Основы автоматики энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1981. 432 с.

4. Данильчук В.Н. Автоматика ограничения изменений частоты энергосистем. Киев: 2014. 439 с.

5. Семенов В.А. Противоаварийная автоматика в ЕЭС России. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. 104 с.

6. Микропроцессорное устройство защиты и автоматики «Сириус-ТН»: руководство по эксплуатации. ЗАО «РАДИУС Автоматика». URL: http://www.rza.ru/upload/iblock/89f/sirius_tn.pdf (дата обращения: 15.06.2017).

7. MiCOM P921/P922 & P923.Voltage and Frequency Relays. Technical Guide // Schneider Electric. URL: http://www.schneider-electric.com/library/SCHNEIDER_ELECTRIC/SE_LOCAL/APS/210472_462A/MiCOM_P92x_Manual_Technical_Guide_P92x_EN_T_I52.pdf (дата обращения: 15.06.2017).

8. Терминал трансформатора напряжения секции типа БЭ2502А04ХХ // ООО НПП «ЭКРА». URL: zistons.ru/rele/ekra/re_be2502a04.pdf (дата обращения: 15.06.2017).

9. Balancing and frequency control. A Technical Document. Princeton: NERC Resources Subcommittee, 2011. 53 p.

Авторы публикации

Непша Федор Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение горных и промышленных предприятий» Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева. E-mail: nepshafs@gmail.com.

Глушкова Алиса Игоревна – магистрант группы ЭПмоз-161 Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

Воробьева Дарья Юрьевна – магистрант группы ЭПмоз-161 Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

References

1. Rabinovich, R.S. Avtomaticheskaya chastotnaya razgruzka energosistem [Automatic frequency unloading of power systems]. 2-e izd. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 352 p.
2. Berkovich, M.A., Komarov, A.N., Semenov, V.A. Osnovy avtomatiki energosistem [Basics of automation of power system]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 432 p.
3. Danil'chuk, V.N. Avtomatika ogranicheniya izmeneniy chastoty energosistem [Automation of limiting the change in the frequency of power systems]. Kiev: 2014. 439 p.
4. Semenov V.A. Protivoavariynaya avtomatika v EES Rossii [Automatic emergency control in UES of Russia]. Moscow: NTF "Energoprogress", 2004. 104 p.
5. STO 59012820.29.020.003-2016. Releynaya zashchita i avtomatika. Avtomaticheskoe protivavariynoe upravlenie rezhimami energosistem. Mikroprotsessornye ustroystva avtomaticheskoy chastotnoy razgruzki. Normy i trebovaniya [Relay protection and automation. Automatic emergency control of power system modes. Microprocessor devices for automatic frequency unloading. Norms and requirements]. Standart AO «SO EES». Introduced. 2016-08-16. Moscow, 2016. 19 p.
6. Mikroprotsessornoe ustroystvo zashchity i avtomatiki «Sirius-TN». Rukovodstvo po ekspluatatsii [Microprocessor protection and automation device "Sirius-TN". Manual]. . CJSC «RADIUS Avtomatika». URL: http://www.rza.ru/upload/iblock/89f/sirius_tn.pdf (Accessed: 15.06.2017).
7. MiCOM P921/P922 & P923.Voltage and Frequency Relays. Technical Guide // Schneider Electric. URL: http://www.schneider-electric.com/library/SCHNEIDER_ELECTRIC/SE_LOCAL/APS/210472_462A/MiCOM_P92xManual_Technical_Guide_P92x_EN_T_I52.pdf (Accessed: 15.06.2017).
8. Terminal transformatora napryazheniya sektsii tipa BE2502A04XX [Terminal of the voltage transformer of the section type BE2502A04XX]. Ltd. NPP "EKRA". URL: zistons.ru/rele/ekra/re_be2502a04.pdf (Accessed: 15.06.2017).
9. Balancing and frequency control. A Technical Document. Princeton: NERC Resources Subcommittee, 2011. 53 p.

Authors of the publication

Fedor S. Nepsha — senior lecturer, Department "Power supply of mining and industrial enterprises", Kuzbass State Technical T.F. Gorbachev University.

Alisa I. Glushkova – graduate student EPmoz-161, Kuzbass State Technical T.F. Gorbachev University.

Daria Yu. Vorobyeva – graduate student EPmoz-161, Kuzbass State Technical T.F. Gorbachev University.

Поступила в редакцию

04 июля 2017 г.

УДК 662.6:620.98

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЯ НА ОБЪЕКТАХ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

О.В. Афанасьева, А.А. Галькеева, А.Р. Вафин, Г.Р. Мингалеева

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

Резюме: В работе проанализированы перспективы использования местного твердого топлива как энергоресурса на объектах малой распределенной энергетики. Проведена оценка обеспеченности углем регионов России. Запасы углей по каждому из регионов приведены к единым параметрам – в расчете на душу населения, площадь территории и валовой региональный продукт. Это позволило провести сравнительную оценку с выявлением регионов, где размещение объектов малой энергетики (мини-ТЭС) является предпочтительным.

Ключевые слова: мини-ТЭС, уголь, регионы России, местное топливо.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00295 «А».

THE ANALYSIS OF PROSPECTS OF USING COAL AT THE OBJECTS OF SMALL DISTRIBUTED GENERATION

O.V. Afanaseva, A.A. Galkeeva, A.R. Vafin, G.R. Mingaleeva

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Kazan State Power Engineering University
eccolga@mail.ru

Abstract: In the article the prospects of using local solid fuel as an energy resource at the objects of small distributed generation is analyzed. The estimation of coal supply of Russian regions is carried out. Coal reserves for each of the regions are reduced to the unitary parameters - per head of the population, area and gross regional product which allowed a comparative assessment with the identification of regions where the location of low-capacity power plant is preferable.

Keywords: low-capacity power plant, coal, regions of Russia, local fuel.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 17-08-00295 «A».

Введение

Энергетическая безопасность страны является одним из ключевых показателей ее стабильного экономического роста. Высокая степень износа энергогенерирующего оборудования крупных станций, потери в электрических сетях, неудовлетворительное качество электроснабжения потребителей – эти и многие факторы свидетельствуют о необходимости переосмысления структуры энергоснабжения нашей страны. Эти аспекты

затрагивались и на прошедшем 20 февраля 2017 года круглом столе «Распределенная энергетика, как важное направление развития современной энергетики», организованного Комитетом Государственной Думы по энергетике [1].

Участники круглого стола отметили следующие очевидные предпосылки для развития распределенной энергетики в России:

- эффективные технологии распределенной генерации, использование местных как возобновляемых, так и традиционных ресурсов, развитие технологий переработки топлива расширяют возможности для ее применения;

- расположение объектов малой распределенной энергетики в непосредственной близости от потребителей позволяет снизить потери в сетях, внедрение технологий когенерации и тригенерации повышает эффективность использования топлива;

- интеллектуализация энергетических установок, систем управления сетями и потреблением энергии, «умные сети» позволяют удовлетворить любые запросы потребителей.

Стоит отметить, что во всем мире уже давно прослеживается тенденция развития децентрализованного энергоснабжения [2; 3]. В отдельных европейских странах доля малой энергетики в среднем составляет около 10% (в Дании достигает 50%) с тенденцией к росту, в том числе за счет использования возобновляемых источников энергии. Доля малой генерации (станции мощностью до 30 МВт) в нашей стране сейчас составляет 1% в центральном федеральном округе и достигает 14% в дальневосточном федеральном округе [1]. Вместе с тем, в рамках круглого стола были отмечены и барьеры для быстрого роста доли малой энергетики в нашей стране, касающиеся, в большинстве случаев, законодательства Российской Федерации, содержащего существенное количество норм, которые сдерживают вложение инвестиций в производство установок по производству энергии на мини-ТЭС. В этой связи необходимо внесение правок в законодательные акты и совершенствование структуры малой энергетики, о чем говорилось уже ранее в статье.

Одной из сфер применения распределенной генерации является удовлетворение потребности в энергии удаленных районов, что для обширной территории нашей страны представляется особенно актуальным. Энергообеспечение промышленных предприятий, объектов военного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по безопасности и бесперебойному снабжению энергией, в ряде случаев также может достигаться силами малой энергетики – мини-ТЭС.

Как отмечалось, малая распределенная энергетика ориентируется, главным образом, на использование местных природных ресурсов. Во-первых, за счет этого достигается автономность данных установок, так как отсутствует зависимость от привозного топлива, условий его доставки. Во-вторых, использование местного топлива позволяет значительно сократить расходы на его транспортировку, что, в конечном итоге, отражается на стоимости вырабатываемой энергии.

Наша страна располагает значительными запасами твердого топлива, и в этом ключе использование каменных и бурых углей на мини-ТЭС для многих регионов нашей страны является оптимальным вариантом. Для объектов малой энергетики должна быть сформирована ресурсная база, которая позволит выбрать оптимальный регион строительства и вид топлива. Необходимо учитывать, что многие угольные месторождения работают исключительно на обеспечение запросов крупных станций и не смогут обеспечить топливом малые энергетические объекты. В рамках данной статьи авторами были актуализированы данные по запасам твердым топливом (каменные и бурые угли) регионов нашей страны, выработке энергии на угольном топливе, объемам добычи. Запасы и добыча угольного топлива для каждого региона приведены к единым показателям – в расчете на душу населения, площадь и валовый региональный продукт.

Основная часть

Российская Федерация занимает 2 место в мире по запасам углей – более 157 млрд т (108 млрд т бурого и 49 млрд т каменного угля), что составляет 18% мировых запасов [4]. По итогам 2016 года Россия занимает 5 место в мире по добыче угля – 395 млн т/год, что составляет 5,2% от общей добычи. Добыча угля в России ведется в 7 федеральных округах и 25 субъектах Федерации. Ее осуществляют 192 угольных предприятия, в том числе 71 угольная шахта и 121 разрез.

По данным Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического комплекса добыча каменного угля ведется в следующих субъектах РФ: Мурманская область, Республика Коми, Ростовская область, Новосибирская область, Кемеровская область, Красноярский край, Республика Хакасия, Республика Тыва, Иркутская область, Забайкальский край, Республика Саха, Хабаровский край, Приморский край.

Бурый уголь добывают: Тульская область, Оренбургская область, Свердловская область, Челябинская область, Алтайский край, Кемеровская область, Красноярский край, Иркутская область, Республика Бурятия, Забайкальский край, Республика Саха, Амурская область, Хабаровский край, Чукотский АО, Еврейская автономная область, Приморский край, Лучегорский угольный р., Сахалинская область

Добыча угля в России сосредоточена в Сибирском ФО, на который приходится 85% общероссийской добычи. Здесь расположены крупнейшие добывающие субъекты Российской Федерации: Кемеровская область (вклад в общероссийский показатель — 58%), Красноярский край (11%) и Забайкальский край (5%). На Дальнем Востоке основная добыча ведется в Якутии (4 %), а на Северо-Западе — в Республике Коми (4%) [4].

По выработке электроэнергии Россия также занимает 5 место – 1148 млрд кВт·ч [5].

С использованием аналитических данных и информационных источников [6; 7] была актуализирована и структурирована информация о добыче и балансовым запасам угля, мощности электростанций и структуре мощностей по типу электростанций для субъектов РФ (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики угледобывающих регионов Российской Федерации

№ п/п	Округ, регион	Добыча угля, тыс. т/год	Балансовые запасы угля, млн т	Мощность Электростанций МВт; выработка электроэнергии, в год, млн т	Структура мощностей, МВт
Северо-западный федеральный округ					
1	Мурманская область (включая, арх. Шпицберген)	120	135	3643; 16565,5	ГЭС – 1589,5; ТЭЦ – 293,5, в т.ч. на угле – 266; АЭС – 1760;
2	Республика Коми	14600	7180	1243; 10261,2	ТЭЦ -1243, в т.ч. на угле – 313; ГТУ – 100; ТЭС – 1060, в т.ч. на угле – 1060;
Центральный федеральный округ					
3	Тульская область	—	1337	2528; 5465,09	ТЭС – 2396; в т.ч. на угле – 450; ТЭЦ - 367

Продолжение таблицы 1

Приволжский федеральный округ					
4	Оренбургская область	570	737	3739; 14555,06	ТЭС – 2400; ТЭЦ – 1211; ГЭС – 30
Южный федеральный округ					
5	Ростовская область	9500	501	3007,2; 32127,9	ТЭЦ – 714; ТЭС – 2293,2, в т.ч. на антраците – 79,2; АЭС – 2000; ГЭС – 211,5; МГЭС – 3,5
Уральский федеральный округ					
6	Челябинская область	–	497	5629,6; 18594,25	ТЭЦ – 1785,8, в т.ч. на угле – 330; ТЭС – 3824, в т.ч. на угле – 2234; ГТ ТЭЦ – 18
Сибирский федеральный округ					
7	Новосибирская область	5400	168	3024,5; 14264,9	ТЭЦ – 2549,5, в т.ч. на угле – 2549,5; ГЭС – 475;
8	Кемеровская обл.	227400	52500	5353; 25758,8	ТЭЦ – 5353, в т.ч. на угле – 4964;
9	Красноярский край	40000	72000	17653; 68939,4	ТЭЦ – 7615, в т.ч. на угле – 6180; ГЭС – 10038
10	Республика Бурятия	2000	2701	1308,77; 5407,0	ТЭЦ – 1308, 77, в т.ч. на угле – 1380,77
11	Республика Хакасия	16000	5300	6996,2; 23164,0	ТЭЦ – 270, в т.ч. на угле – 270; ГЭС – 6721; Солнечные – 5,2
12	Республика Тыва	1221	2091	17; 84,9	ТЭЦ – 17
13	Иркутская область	16800	5900	13492,4; 48642,3	ТЭЦ – 3952,2, в т.ч. на угле 3865,2; ГЭС – 9540,2
14	Забайкальский край	12200	6900	1565,2; 7263,9	ТЭЦ – 910,2, в т.ч. на угле – 910,2; ТЭС – 655, в т.ч. на угле 655
15	Алтайский край	–	26,5	1262; 5801,07	ТЭЦ – 1426, в т.ч. на угле – 1226,; ГТ ТЭЦ – 36
Дальневосточный федеральный округ					
16	Республика Саха	15246	2573	2356,6; 9006	ТЭС – 986, в т.ч. на угле – 618; ТЭЦ – 67,5, в т.ч. на угле – 67,5; ГЭС – 957,5; ДЭС – 345,6
17	Амурская область	3381	3630	3722; 13797,16	ТЭЦ – 280, в т.ч. на угле 280; ТЭС – 102, в т.ч. на угле 102; ГЭС – 3340

Продолжение таблицы 1

18	Хабаровский край	7000	1604	2723; 9553,7	ТЭЦ – 2639,1, в т.ч. на угле – 285; ТЭС – 84, в т.ч. на угле – 84;
19	Чукотский автономный округ	233	29,02	201,15; 475,2	ТЭЦ – 119,15, в т.ч. на угле 119,15; ТЭС – 34, в т.ч. на угле – 34; АЭС – 48
20	Еврейская автономный округ	110	3,5	0,63	ТЭЦ – 0,63, в т.ч. на угле – 0,63
21	Приморский край	800	329	3907,8; 11565,3	ТЭЦ – 946,8 в т.ч. на угле – 897; ТЭС – 1715, в т.ч. на угле – 1670; ВЭС – 576
22	Сахалинская область	5500	2500	844; 1973,16	ТЭЦ – 691,8; ТЭС – 48; ДЭС – 4,8; ВЭС – 0,45

Среди ТЭЦ и ТЭС угледобывающих регионов на твердом топливе работают станции, представленные в табл. 2 [7]. Большая часть из них обеспечивают теплом и электричеством крупные населенные пункты. При этом для многих регионов России остро стоит вопрос энергообеспечения отдаленных населенных пунктов и промышленных предприятий. Для определения возможности строительства мини-ТЭС на местном твердом топливе расчетным путем было определено количество угля, потребляемого электростанциями в угледобывающих регионах. Полученные данные использовались для определения характеристик (табл. 3).

Таблица 2

Угольные электростанции угледобывающих регионов Российской Федерации

№ п/п	Угледобывающий регион Российской Федерации	Угольные электростанции	Мощность, МВт
1	Мурманская область	Апатитская ТЭЦ	266
2	Республика Коми	Воркутинская ТЭЦ-2 Воркутинская ТЭЦ-1 Интинская ТЭЦ	270 25 18
3	Тульская область	Черепетская ГРЭС	450
4	Челябинская область	Троицкая ГРЭС / ТЭЦ ММК	2234 / 330
5	Ростовская область	Экспериментальная ТЭС	79,2
6	Новосибирская область	Новосибирская ТЭЦ-2 Новосибирская ТЭЦ-3 Новосибирская ТЭЦ-4 Новосибирская ТЭЦ-5 Барабинская ТЭЦ	340 511,5 384 1200 114
7	Кемеровская область	Западно-Сибирская ТЭЦ Ново-Кемеровская ТЭЦ Южно-Кузбасская ГРЭС Кемеровская ГРЭС Кузнецкая ТЭЦ Центральная ТЭЦ Кемеровская ТЭЦ	600 565 554 485 108 100 80

Продолжение таблицы 2

8	Красноярский край	Красноярская ТЭЦ	481
		Красноярская ТЭЦ-2	465
		Красноярская ТЭЦ-3	208
		Минусинская ТЭЦ	85
		Канская ТЭЦ	24
9	Иркутская область	Иркутская ТЭЦ-10	1110
		Ново-Иркутская ТЭЦ	655
		Усть-Илимская ТЭЦ	525
		Иркутская ТЭЦ-9	475
		Иркутская ТЭЦ-11	350,3
		Иркутская ТЭЦ-6	270
		Ново-Зиминская ТЭЦ	240
		Иркутская ТЭЦ-1	185
		Иркутская ТЭЦ-16	18
		Иркутская ТЭЦ-5	18
		Иркутская ТЭЦ-3	11,7
		Иркутская ТЭЦ-12	7,5
10	Республика Хакасия	Абаканская ТЭЦ	270
11	Забайкальский край	Харанорская ГРЭС	655
		Читинская ТЭЦ	452,8
		ТЭЦ ППГХО (Краснокаменская ТЭЦ)	410
		Приаргунская ТЭЦ	24
		Читинская ТЭЦ-2	12
		Шерловогорская ТЭЦ	12
12	Алтайский край	Бийская ТЭЦ-1	535
		Барнаульская ТЭЦ-3	430
		Барнаульская ТЭЦ-2	200
		Рубцовская ТЭЦ	61
13	Республика Бурятия	Гусиноозерская ГРЭС	1160
		Улан-Удэнская ТЭЦ-1	148,77
14	Амурская область	Благовещенская ТЭЦ	280
		Райчихинская ГРЭС	102
15	Еврейская автономная область	Ургальская котельная Биробиджанской ТЭЦ	0,63
16	Республика Саха	Нерюнгринская ГРЭС	618
		Чульманская ТЭЦ	48
		Якутская ТЭЦ	12
		Депутатская ТЭЦ	7,5
17	Чукотский АО	Анадырская ТЭЦ	84,65
		Чаунская ТЭЦ	34,5
		Эгвекинотская ГРЭС	34
18	Хабаровский край	Сахалинская ГРЭС	84
		Амурская ТЭЦ-1	285
19	Приморский край	Партизанская ГРЭС	203
		Приморская ГРЭС	1467
		Владивостокская ТЭЦ	497
		Артемовская ТЭЦ	400

Авторами статьи был проведен анализ обеспеченности и применения угля в энергетике угледобывающих субъектов РФ с целью определения регионов для строительства объектов малой распределенной энергетики, работающих на местном твердом топливе.

В табл. 3 представлены приведенные характеристики добычи угля в регионах за вычетом количества, используемого угольными электростанциями, на валовой региональный продукт (ВРП) и запасов углей на душу населения и площадь рассматриваемых регионов.

Таблица 3

№ п/п	Округ, регион	Приведенные параметры			ВРП, млн руб.	Население, тыс.	Площадь региона, тыс. кв. км
		добыча/ВРП т/ млн руб.	запасы/ население, т/чел.	запасы/ площадь региона, т/кв. км			
1	Мурманская область и архипелаг Шпицберген)	—*	178,2	931,7	390390	757,6	144,9
2	Республика. Коми	16,9	8442,1	17263,8	523211	850,5	415,9
3	Тульская область	—*	891,9	52065,9	476,6	1499	25,7
4	Оренбургская область	0,73	370,5	5957,9	774,9	1 989	123,7
5	Ростовская обл.	9,16	118,3	4970,2	1000247	4236	100,8
6	Челябинская область	—*	141,9	5614	1170,3	3 502	88,5
7	Новосибирская область	—*	62	942,8	980250	2709,4	178,2
8	Кемеровская область	245,1	19380,9	549738,2	842619	2708,8	95,5
9	Красноярский край	—*	25185,6	30769,2	1618166	2858,8	2340
10	Алтайский край	—*	11,2	157,7	492,1	2 365	168
11	Республика Бурятия	31,3	2744,9	7687,8	204,2	984	351, 3
12	Республика Хакасия	46,4	9857,4	85622	320095	537,7	61,9
13	Республика Тыва	25,8	6557,9	12263,9	150258	318,9	170,5
14	Иркутская область	1,3	2449,2	7683,3	419885	2408,9	767,9
15	Забайкальский край	—*	6395	15990,7	229303	1078,9	431,5
16	Республика Саха	7,3	2672,3	834,3	1699932	962,8	3084
17	Амурская область	2,54	4531,8	10030,2	276,9	801	361, 9

Продолжение таблицы 3

18	Еврейская автономная область	2,35	21,34	96,5	44,9	164	36,3
19	Хабаровский край	12,7	1203	2034	427651	1333,3	788,6
20	Чукотский автономный округ	—*	542,2	175	63900	49	721,4
21	Приморский край	—*	171	1983,1	371098	1923,3	165,9
22	Сахалинская область	5,5	5133,5	28702,3	999,1	487	87,1
* – на основании расчета в данных регионах потребление угля электростанциями превышает добычу							

Заключение и выводы

В результате анализа полученных приведенных параметров запасов углей по угледобывающим регионам РФ были установлены наиболее и наименее перспективные субъекты с точки зрения возможности строительства объектов малой распределенной энергетики, работающих на местном твердом топливе. По всем трем приведенным параметрам лидером является Кемеровская область. Это является прогнозируемым результатом ввиду того, что данный регион обладает высокими показателями по запасам и добыче углей в России. Также стоит отметить Республику Коми, Хакасию, Бурятию, Тыву, приведенные характеристики которых имеют высокие значения.

При существующем уровне добычи угля для Мурманской, Тульской, Челябинской, Новосибирской областей, Красноярского, Приморского и Забайкальского края, Чукотского АО строительство мини-ТЭС, согласно расчетам, является нецелесообразным.

Литература

1. Рекомендации круглого стола на тему: «Распределенная энергетика, как важное направление развития современной энергетики». URL: <http://www.komitet2-13.km.duma.gov.ru/Rekomendacii-po-itogam-meropriyatij/item/221570/> (дата обращения 01.07.2017).
2. Kosmadakis G. Renewable and conventional electricity generation systems: technologies and diversity of energy systems renewable energy governance. G. Kosmadakis, S. Karellas, E. Kakaras. Lecture Notes in Energy 23. pp 9-30. DOI: 10.1007/978-1-4471-5595-9_2.
3. Chodkowska-miszczuk, J. Small-scale renewable energy systems in the development of distributed generation in Poland. J. Chodkowska-miszczuk. Moravian geographical reports. 2014. Vol. 22. pp. 34–43.
4. ТЭК России – 2015. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/9162.pdf> (дата обращения 05.07.2017).
5. Презентация Минэнерго России «Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2016 году. Задачи на среднесрочную перспективу». URL: <https://minenergo.gov.ru/node/7687> (дата обращения 05.07.2017).
6. Российский федеральный геологический фонд «Росгеолфонд». URL: www.rfgf.ru.
7. Энергетика регионов России. URL: <http://energybase.ru/region> (дата обращения 05.07.2017).

Авторы публикации

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, начальник Отдела инноваций и международного сотрудничества Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: eccolga@mail.ru

Галькеева Айгуль Ахтамовна – инженер Отдела инноваций и международного сотрудничества Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Вафин Артем Ринатович – аспирант кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Мингалеева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Recommendations of the round table on the topic: «Distributed energy as an important direction of modern energy development». URL: <http://www.komit2-13.km.duma.gov.ru/Rekomendacii-po-itogam-meropriyatij/item/221570/>.
2. Kosmadakis G. Renewable and conventional electricity generation systems: technologies and diversity of energy systems renewable energy governance. G. Kosmadakis, S. Karellas, E. Kakaras. Lecture Notes in Energy 23. pp 9-30. DOI: 10.1007/978-1-4471-5595-9_2.
3. Chodkowska-miszczuk, J. Small-scale renewable energy systems in the development of distributed generation in Poland. J. Chodkowska-miszczuk. Moravian geographical reports. 2014. Vol. 22. pp. 34–43.
4. Fuel and energy complex of Russia – 2015. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/9162.pdf>.
5. Presentation of the Ministry of Energy of Russia «Results of the work of the Ministry of Energy of Russia and the main results of the functioning of the fuel and energy complex in 2016. Challenges for the medium term. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/7687>.
6. Russian Federal Geological Foundation «Rosgeolfond». URL: www.rfgf.ru.
7. Energy of Russian regions URL: <http://energybase.ru/region>.

Authors of the publication

Olga V. Afanaseva – Cand. Sci. (Techn.), Head of innovation and international communication department.

Aygul A. Galkeeva – engineer of innovation and international communication department.

Artem R. Vafin – postgraduate of faculty of Power engineering.

Guzel R. Mingaleeva – Dr. Sci. (Techn), Chairholder of Power engineering.

Поступила в редакцию

12 сентября 2017 г.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА СТЕНОК КИРПИЧНЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Д.А. Хворенков, О.И. Варфоломеева, Е.В. Корепанов

Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия
HvorenkovDA@mail.ru

Резюме: Представлена методика расчета температурно-влажностного режима кирпичных и железобетонных дымовых труб. Моделируются процессы теплообмена продуктов сгорания в газовом объеме дымовых труб, а также тепло- и массообмена в их стенках. Рассчитаны параметры влагопереноса в стенках железобетонной дымовой трубы в различных режимах работы котельной установки. Определены границы параметров дымовых газов, при которых реализуется «сухой» режим работы железобетонной дымовой трубы.

Ключевые слова: дымовая труба, котельная установка, конденсатообразование, влагоперенос, диффузия водяных паров, температурно-влажностный режим.

CALCULATION OF TEMPERATURE-HUMIDITY MODE OF BRICK AND REINFORCED CONCRETE CHIMNEYS WALLS

D.A. Khvorenkov, O.I. Varfolomeeva, E.V. Korepanov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
HvorenkovDA@mail.ru

Abstract: The method for calculating the temperature-humidity mode of brick and reinforced concrete chimneys is presented. The processes of heat exchange of combustion products in the gas volume of the chimneys and heat and mass transfer in it's walls also, are modeled. The parameters of vapour transfer in the walls of reinforced concrete chimneys in various operating modes of the boiler plant are calculated. The range of flue gases parameters at which the "dry" operating mode of a reinforced concrete chimneys is realized is determined.

Keywords: chimney, boiler plant, condensation, vapour transfer, diffusion of water vapour, temperature-humidity mode.

Введение

При выборе режимов работы котельных установок следует поддерживать параметры потока продуктов сгорания на входе в дымовые трубы в диапазонах, обеспечивающих не только высокие технико-экономические показатели работы котельной, но и безопасные для строительных конструкций труб температурно-влажностные режимы. Поэтому наряду с гидродинамикой потока дымовых газов в дымовой трубе [1; 2] необходимо рассчитывать влагосодержание, теплофизические характеристики дымовых газов и параметры влагообмена [3–5].

Увлажнение материалов стенок кирпичных и бетонных дымовых труб, а также внутренней поверхности стальных дымовых труб при длительном воздействии приводит к разрушению материалов дымовых труб и потере их несущей способности. При расчете увлажненных конструкций необходимо учитывать и влияние их влажностного состояния на характеристики тепло-, влаго- и паропроницаемости материалов [6]. Наибольшее влияние на влажностный режим стенок при эксплуатации дымовых труб оказывает влага, конденсирующаяся или сорбирующаяся на внутренней поверхности стенки трубы. Эта влага, в основном, в виде пара переносится диффузией сквозь стенку кирпичных и железобетонных дымовых труб, которая при неблагоприятных условиях конденсируется в толще стенки трубы.

Теоретические основы

Расчет влажностного режима стенок дымовой трубы заключается в проверке возможности выпадения конденсата на внутренней поверхности трубы и определении зоны возможного выпадения конденсата в толще стенки.

Поддержание температуры внутренней поверхности дымовой трубы τ_B выше температуры точки росы t_d позволяет не допустить конденсации паров воды или серной кислоты на поверхности. Необходимая температура внутренней поверхности может быть обеспечена, в первую очередь, увеличением термического сопротивления ствола трубы или повышением температуры потока дымовых газов.

Проверка на выпадение конденсата может быть проведена по неравенству $e_B > E_B$, которое описывает условия выпадения конденсата, когда упругость водяного пара e_B , вычисленная по температуре внутренней поверхности стенки τ_B , больше максимальной упругости водяного пара E_B , определенной по температуре внутреннего воздуха t_B . Температура внутренней поверхности стенки трубы может быть определена по формуле

$$\tau_B = t_B - \frac{q_l}{\pi \alpha_B d_B}.$$

Линейный тепловой поток для n -слойной стенки, расчетная схема которой показана на рис. 1, запишется:

$$q_l = \frac{t_B - t_H}{\frac{1}{\pi \alpha_B d_B} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\pi \alpha_H d_H}}, \text{ Вт/м,}$$

где α_H – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности дымовой трубы [1; 7] для различных высотных отметок рассматриваемых сечений; t_H – температура наружного воздуха; t_B – температура потока дымовых газов в рассматриваемом сечении; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя стенки дымовой трубы; d_i , d_{i+1} – диаметры слоев стенки дымовой трубы. В случае однослойной стенки $d_i = d_B$, $d_{i+1} = d_H$.

Для расчета теплообмена на внутренней поверхности используется критериальное уравнение

$$\text{Nu} = \frac{\frac{\xi}{8} \text{Re Pr}}{1 + \frac{900}{\text{Re}} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}}; \quad \xi = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^{-2}.$$

Здесь $\text{Re} = v d_B \rho_\Gamma / \mu_\Gamma$ – число Рейнольдса; $\text{Pr} = \mu_\Gamma c_\Gamma / \lambda_\Gamma$ – число Прандтля; v – средняя скорость дымовых газов в трубе; ρ_Γ , c_Γ , λ_Γ , μ_Γ – плотность, удельная массовая изобарная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, динамический коэффициент вязкости дымовых газов соответственно.

По рассчитанному значению Nu вычисляется коэффициент теплоотдачи $\alpha_B = Nu \lambda_{\Gamma} / d_B$ на внутренней поверхности дымовой трубы.

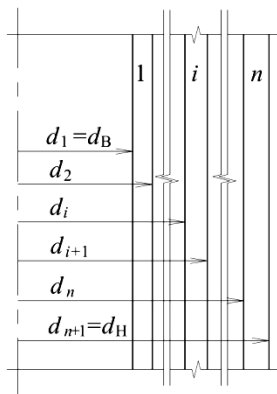


Рис. 1. Расчетная схема многослойной цилиндрической стенки дымовой трубы

Массовый расход дымовых газов определяется по заданным средней в сечении примыкания газохода скорости v_{BX} потока, температуре потока t_{BX} на входе в дымовую трубу с известным внутренним диаметром d_B :

$$G = v_{BX} \rho_{BX} \frac{\pi d_B^2}{4}.$$

Расчет влажностного режима газового объема и стенки дымовой трубы проводится совместно с тепловым расчетом позонно для каждого расчетного k -го сечения, начиная с отметки присоединения газохода и до верхней отметки оголовка трубы (сечение m на рис. 2). Скорость потока $v^{(k)}$ уточняется в каждом сечении дымовой трубы с учетом значений внутреннего диаметра и плотности в предыдущем и следующем сечениях:

$$v^{(k)} = \frac{4G^{(k)}}{\pi (d_B^{(k)})^2 \rho^{(k)}}.$$

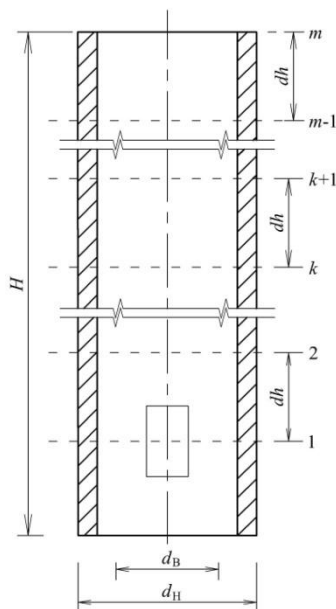


Рис. 2. Схема позонного расчета теплового и влажностного режимов дымовой трубы

Средние между сечениями физические параметры дымовых газов определяются по предварительно заданному значению температуры в верхнем из двух смежных сечений и вычисленному значению температуры в нижнем.

Тепловой поток через n -слойную стенку (рис. 2) в зоне высотой dh со средним по высоте зоны внутренним диаметром d_v и средним по высоте зоны наружным – d_n определяется по формуле для цилиндрической стенки:

$$Q = q_l dh.$$

Расчетное значение средней температуры потока в следующем за расчетным сечением из уравнения теплового баланса с учетом изменения удельной массовой изобарной теплоемкости определяется по формуле (далее верхний индекс, обозначающий принадлежность параметра к текущему сечению, не будет приводиться)

$$t^{(k+1)} = t^{(k)} \frac{c^{(k)}}{c^{(k+1)}} - \frac{Q}{G c^{(k+1)}}. \quad (1)$$

Если заданное значение температуры $t^{(k+1)}$ и расчетное по формуле (1) достаточно близки (не более 0,1%), расчет повторяют с полученным значением температуры.

Относительная влажность дымовых газов в расчетном сечении трубы определяется по формуле

$$\varphi_\Gamma = \frac{r_{\text{H}_2\text{O}} p_{\text{ст}}}{E},$$

где $r_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярная доля водяного пара.

Максимальная упругость водяного пара E , Па, определяется по таблицам насыщенного водяного пара.

Статическая составляющая давления дымовых газов в стволе $p_{\text{ст}}$, Па, определяется по формуле

$$p_{\text{ст}} = B + \Delta p_{\text{ст}}, \quad (2)$$

а разница статического давления в дымовой трубе и барометрического давления наружного воздуха на рассматриваемой высотной отметке h_k , Па – по формуле

$$\Delta p_{\text{ст}} = p_{\text{д}0} + \Delta p_{\text{тр}} - p_{\text{д}}^\Gamma - (p_{\text{H}} - p_\Gamma) g (H - h_k).$$

Здесь B – барометрическое давление наружного воздуха в основании трубы; $p_{\text{д}0}$ – динамическое давление на выходе из дымовой трубы, Па; $p_{\text{д}}^\Gamma$ – динамическое давление на рассматриваемой высотной отметке дымовой трубы, Па; $\Delta p_{\text{тр}}$ – потери давления на трение для участка от рассматриваемого сечения на высоте h_k до устья дымовой трубы высотой H , Па; p_Γ – плотность дымовых газов при температуре t_Γ , кг/м³; p_{H} – плотность наружного воздуха при температуре t_{H} , кг/м³.

Диффузия водяных паров через стенку вызвана разностью парциальных давлений соответствующего компонента в потоке дымовых газов и атмосферного воздуха. Кроме разницы парциальных давлений интенсивность диффузии $g_{\text{H}_2\text{O}}$, мг/(ч·м), определяется паропроницаемостью материала стенки.

Поток пара направлен из среды с большим парциальным давлением в среду с меньшим. Для различных видов топлив с учетом особенностей их сжигания объемное (численно равно объемному) содержание водяных паров может меняться в диапазоне $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,10 \div 0,19$, что примерно соответствует диапазону давлений $e = 10,0 \div 19,0$ кПа (нижний предел соответствует сжиганию Кузнецкого угля с коэффициентом избытка воздуха

1,2; верхний – природного газа с коэффициентом избытка воздуха 1,05). Подробнее объемные содержания водяных паров для различных видов топлива представлены в работе [8].

В координатах $e - R_{\Pi}$ парциальное давление водяных паров при установившемся режиме без конденсации изменяется по линейному закону – линия с постоянным тангенсом угла наклона g_{H_2O} во всех слоях (R_{Π} – сопротивление паропрооницанию слоя дымовой трубы). Если парциальное давление пара e в каком-либо сечении стенки больше максимальной упругости водяного пара E (то есть происходит охлаждение влажных дымовых газов более нагретых, чем стенка), то часть влаги из диффундирующего воздуха выпадает в виде конденсата и в сечении устанавливается условие $e = E$.

Поскольку процесс диффузии пара происходит очень медленно, то определенная этим методом зона является предельно возможной для стационарного состояния. Действительная зона может оказаться существенно больше (в сырых стенках) или меньше (в сухих стенках), так как процесс диффузии протекает медленнее, чем происходит изменение климатических условий снаружи трубы.

Значения упругости водяного пара в сечениях стенок определяются по температурному полю. Текущая температура на диаметре d в пределах i -го слоя

$$t_r = t_B - (t_B - t_H) \frac{\ln \frac{d}{d_i}}{\ln \frac{d_{i-1}}{d_i}}, \quad d_B \leq d \leq d_H.$$

По вычисленному одномерному полю температуры определяется максимальная упругость водяного пара E по формулам аппроксимации таблицы температурной зависимости максимальной упругости водяного пара.

По температуре продуктов сгорания в дымовой трубе t_B определяется максимальная упругость водяного пара E_B , а по температуре наружного воздуха t_H – максимальная упругость водяного пара наружного воздуха E_H . По относительной влажности наружного воздуха вычисляется упругость водяного пара:

$$e_H = E_H \phi_H, \text{ Па.}$$

Парциальное давление (упругость) водяного пара дымовых газов может быть определено по известному молярному, численно равному объемному, содержанию водяных паров $r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_r$ и статическому давлению продуктов сгорания в трубе:

$$e_B = r_{H_2O} p_{ст}, \text{ Па.} \quad (3)$$

Сопротивление паропрооницанию цилиндрической стенки дымовой трубы:

$$R_{\Pi_огр} = R_{\Pi_B} + \sum_{i=1}^n R_{\Pi_i} + R_{\Pi_H}, \text{ Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м} / \text{мг}. \quad (4)$$

Сопротивление парообмену у поверхности стенки, по аналогии с сопротивлением теплоотдаче, обратно пропорционально коэффициенту влагообмена β_{Π} . Сопротивление влагоотдачи плоской стенки может быть определено [9]:

$$R_{\Pi_B(H)} = \left(1 - \frac{\phi}{100}\right) / 0,1333, \text{ Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{мг}. \quad (5)$$

Сопротивление влагоотдачи для цилиндрической стенки определяется по β_{Π} , отнесенному к поверхности трубы:

$$R_{\Pi} = \frac{2}{\beta_{\Pi} d_{B(H)}}, \text{ Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м} / \text{мг}.$$

Сопротивление паропрооницанию слоя стенки

$$R_{\Pi_i} = \frac{1}{\mu_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}, \text{ Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м/мг}.$$

Поток пара на 1 м длины трубы

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{e_{\text{B}} - e_{\text{H}}}{R_{\Pi_огр}}, \text{ мг/(ч} \cdot \text{м)}. \quad (6)$$

Упругость водяного пара на внутренней поверхности

$$e_{\tau_B} = e_{t_B} - g_{\text{H}_2\text{O}} R_{\Pi_B}, \text{ Па},$$

а на наружной поверхности

$$e_{\tau_H} = e_{t_H} + g_{\text{H}_2\text{O}} R_{\Pi_H}, \text{ Па}.$$

Далее определение зоны возможного выпадения конденсата выполняется графически [10]. В координатах $e - R_{\Pi}$ в выбранном масштабе строится линия парциальных давлений $e_t = f(R_{\Pi})$ (рис. 3) и линия максимальных парциальных давлений $E_t = f(R_{\Pi})$. Линия $e_t = f(R_{\Pi})$ строится по двум точкам: e_{τ_B} на внутренней поверхности и e_{τ_H} на наружной поверхности стенки. Точки соединяются прямой линией.

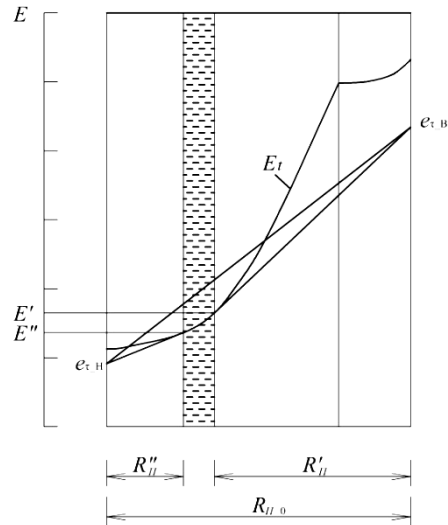


Рис. 3. Определение зоны возможного выпадения конденсата

Если линия максимальных парциальных давлений E_t выше линии парциальных давлений e_t , то конденсации водяных паров в толще не происходит. Если линии e_t и E_t пересекаются, на участках, где линия e_t выше линии E_t возможна конденсация пара, проходящего через слои стенки. Для определения зоны конденсации из точек e_{τ_B} и e_{τ_H} на поверхностях стенки проводят касательные к линии E_t . Между точками касания находится зона возможной конденсации влаги.

Точка касания определяется методом последовательного смещения по линии $E_t = f(R_{\Pi})$ с корректировкой угла наклона секущей до достижения условия касания. По точкам касания определяется: сопротивление паропроницанию участка стены от внутренней поверхности до начала конденсации R'_{Π} , от конца зоны конденсации до

наружной поверхности R_{Π}'' ; максимальное парциальное давление пара в точке начала зоны конденсации E' и максимальное парциальное давление пара в точке конца зоны E'' .

Вычисляется интенсивность потока пара, подходящего к зоне:

$$g' = (e_{\tau_B} - E') / R_{\Pi}', \text{ мг/(ч} \cdot \text{м)},$$

выходящего из зоны:

$$g'' = (E'' - e_{\tau_H}) / R_{\Pi}'', \text{ мг/(ч} \cdot \text{м)},$$

и количество влаги, сконденсировавшейся в зоне возможного выпадения конденсата, участка трубы высотой dh :

$$G_{\Pi} = (g' - g'') dh, \text{ мг/ч}.$$

Расчеты выполняются для всех высотных отметок до верха дымовой трубы. Приведенный расчет теплового и влажностного режима стенки дымовой трубы численно реализован на языке программирования Паскаль. В программе учтено изменение скорости продуктов сгорания при их охлаждении и изменение относительной влажности продуктов сгорания. Методика определения возможной зоны выпадения конденсата водяного пара может быть применена и к парам серной кислоты.

С применением вышеприведенной методики проведено исследование тепло- и массообменных процессов в стенке железобетонной сборной цилиндрической дымовой трубы внутренним диаметром 1,2 и высотой 30 м по типовому проекту [11]. Присоединение газоходов – надземное на отметке 4,4 м по центру высоты газохода, толщина стенки трубы до высотной отметки 8,0 м составляет 250 мм; выше отметки 8,00 м – 100 мм (рис. 4). По проекту дымовая труба однослойная, железобетонная с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{тр}} = 2,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и коэффициентом паропроницаемости $\mu = 0,03 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

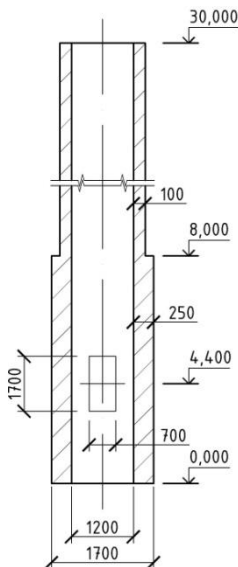


Рис. 4. Геометрическая модель расчетной области сборной железобетонной дымовой трубы $H = 30 \text{ м}$, $d_0 = 1,2 \text{ м}$ по типовому проекту 907-2-229 [11]

В работе [9] автор при расчете влажностного режима рекомендует принимать среднюю температуру наиболее холодного месяца. Расчет проводился для климатических параметров наиболее холодного месяца г. Ижевска: средняя температура $t_H = -13,4^\circ \text{C}$, средняя относительная влажность $\phi_H = 83\%$, барометрическое давление $B = 99700 \text{ Па}$ [12].

Физические параметры дымовых газов соответствуют продуктам полного сгорания природного газа состава: $\text{CH}_4 = 95,81\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,35\%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,75\%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,25\%$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,07\%$; $\text{CO}_2 = 0,16\%$; $\text{N}_2 = 0,60\%$; $\text{O}_2 = 0,01\%$. При коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$ в дымовых газах молярная доля водяных паров $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,192$. Расчет выполнялся с отметки центра присоединения газохода 4,4 м и до верха дымовой трубы (отм. 30,0 м). Шаг расчетной сетки по высоте dh составил 0,434 м. Скорость дымовых газов на входе в дымовую трубу принята 15 м/с, согласно рекомендациям на основе технико-экономических расчетов; температура продуктов сгорания на входе $t_{\text{вх}} = 110^\circ\text{C}$.

Результаты. Обсуждение

Темп снижения температуры дымовых газов до высотной отметки 8,0 м при толщине стенки 250 мм по результатам расчета составил $0,15^\circ\text{C}/\text{м}$, с отметки 8,0 до устья трубы, где толщина стенки 100 мм, – $0,22^\circ\text{C}/\text{м}$. По причине снижения температуры по высоте трубы снижалась и максимальная упругость водяных паров, что отразилось на величине относительной влажности дымовых газов: относительная влажность увеличилась с 13,3 до 16,0%.

Расчет показал наличие конденсатообразования в стенке с отметки входа газоходов 4,4 м до сечения, где изменяется толщина стенки трубы на отметке 8,0 м, а также с отметки 24,8 м до устья дымовой трубы. На рис. 5 показано изменение упругости и максимальной упругости водяных паров по толщине стенки дымовой трубы на высотных отметках 6,1 м и 27,4 м.

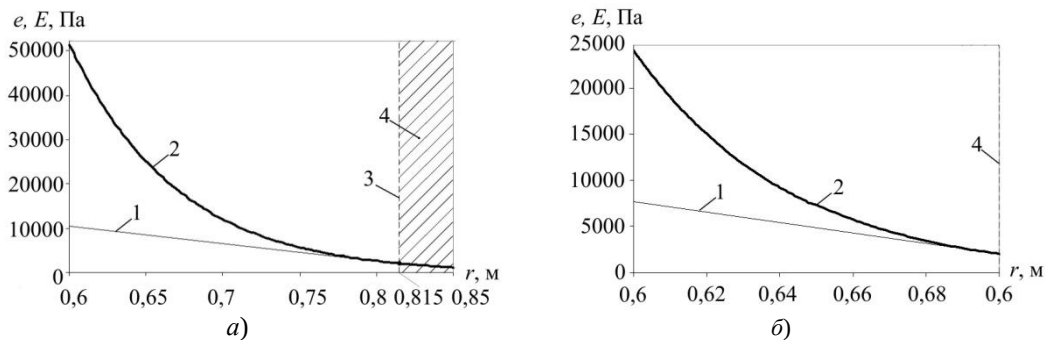


Рис. 5. Распределение парциального давления водяных паров по радиусу r стенки дымовой трубы: а) на высотной отметке 6,1 м; б) на высотной отметке 27,4 м.

1 – линия упругости водяного пара; 2 – линия максимальной упругости водяного пара;
3 – граница зоны конденсатообразования; 4 – зона конденсатообразования

Зона возможного конденсатообразования в нижней части трубы согласно расчету располагается в наружных слоях стенки: с радиуса $r = 0,815$ м до наружного радиуса трубы $r = 0,850$ м. В верхней части дымовой трубы (отм. 27,4 м) конденсация происходит на ее наружной поверхности. При толщине стенки 0,1 м поток пара $g_{\text{H}_2\text{O}} = 6815$ мг/(ч·м). Определяющим фактором в случае конденсации в верхней части дымовой трубы является охлаждение продуктов сгорания, в нижней – увеличенная толщина стенки. При толщине стенки 0,25 м поток пара составляет $g_{\text{H}_2\text{O}} = 4982$ мг/(ч·м).

При таком режиме работы котельной установки отсутствуют условия для конденсации водяных паров на внутренней поверхности дымовой трубы, однако это не обеспечивает благоприятный влажностный режим работы железобетонных стенок трубы. Как в нижней, так и в верхней частях дымовой трубы увлажнению подвержены наружные слои стенки. Это подтверждается наиболее распространенными видами дефектов кирпичных и железобетонных дымовых труб при сжигании природного газа [8].

Для определения минимальной температуры дымовых газов на входе в вышеописанную железобетонную дымовую трубу, при которой в ее стенке отсутствует конденсация водяных паров, проведен численный эксперимент. Варьировались значения скорости $v_{\text{вх}}$ дымовых газов на входе в трубу для природного газа (молярная доля водяных паров в продуктах сгорания при $\alpha = 1,05$ $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,192$) и каменного угля (молярная доля водяных паров в продуктах сгорания при $\alpha = 1,20$ $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,094$). Результаты расчетов приведены в виде графиков зависимости минимальной температуры на входе в дымовую трубу, при которой в ее стенках не происходит конденсации водяных паров, от скорости продуктов сгорания в трубе (рис. 6).

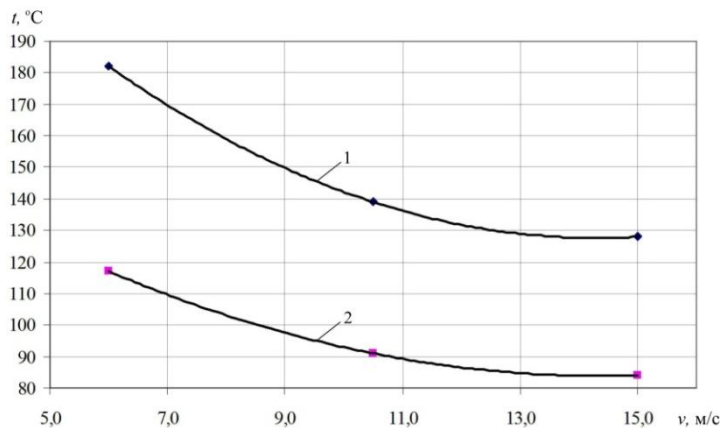


Рис. 6. Минимальная температура дымовых газов на входе в дымовую трубу [11] при различной скорости на входе и сжигаемом топливе: 1 – природный газ; 2 – каменный уголь

По результатам расчетов можно сделать вывод, что на влажностный режим стенок дымовой трубы существенное влияние оказывает скорость течения дымовых газов в трубе. При снижении скорости, что возникает всегда при снижении тепловой нагрузки на котельную, возможна конденсация водяных паров в стенке трубы, увеличивается минимальная температура дымовых газов на входе в трубу, при которой сохраняется сухой режим в стенках трубы. Также влагосодержание дымовых газов оказывает существенное влияние на влажностный режим стенок.

На рис. 7 показано изменение величины потока водяного пара по высоте сборной железобетонной дымовой трубы $H = 30$ м, $d_0 = 1,2$ м [11] при температуре дымовых газов на входе в трубу $t_{\text{вх}} = 110$ °C и $t_{\text{вх}} = 160$ °C при сжигании природного газа и каменного угля соответственно. Кривые получены расчетом потока по формуле (6). На всех кривых видно увеличение потока пара через стенку трубы с ростом высотной отметки. Это связано с возрастанием парциального давления водяного пара внутри трубы при увеличивающемся по высоте статическом давлении потока дымовых газов и уменьшением сопротивления парообмену на внутренней поверхности трубы (формулы (2), (3), (4)). Резкое увеличение потока на отметке 8,0 м объясняется ступенчатым уменьшением толщины стенки трубы с 250 до 100 мм на этой высотной отметке.

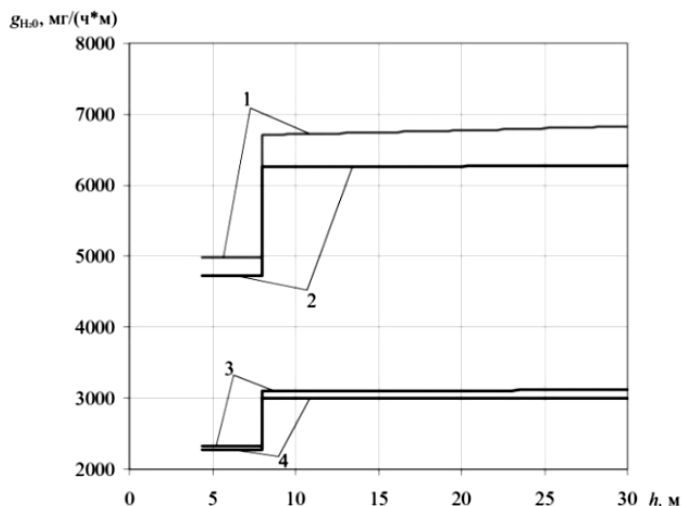


Рис. 7. Распределение потока водяного пара g_{H_2O} по высоте железобетонной дымовой трубы по типовому проекту [11] при температуре дымовых газов на входе в трубу: 1 – $t_{BX} = 110^\circ C$, топливо природный газ; 2 – $t_{BX} = 160^\circ C$, топливо природный газ; 3 – $t_{BX} = 110^\circ C$, топливо каменный уголь; 4 – $t_{BX} = 160^\circ C$, топливо каменный уголь

На рис. 8 показан график изменения потока водяного пара через стенку дымовой трубы при различных температурах продуктов сгорания природного газа и каменного угля на входе в трубу по [11]. Увеличение температуры дымовых газов приводит к уменьшению потока. Меньшее значение потока при сжигании каменного угля, чем при сжигании природного газа, объясняется существенно меньшим влагосодержанием продуктов сгорания.

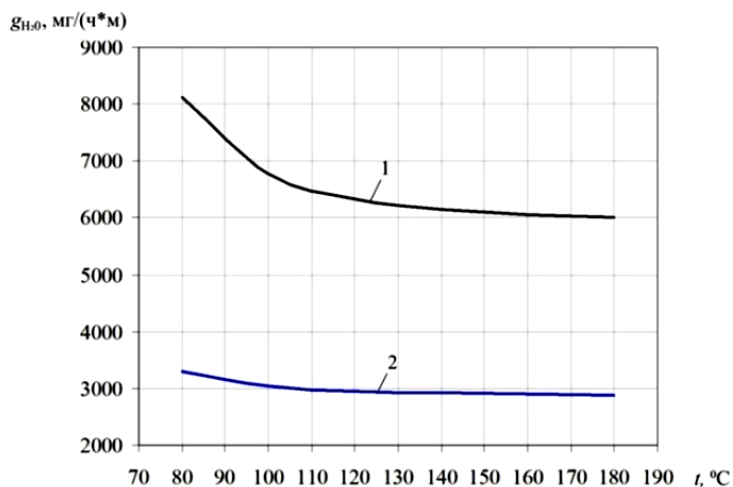


Рис. 8. Поток водяного пара g_{H_2O} при различной температуре дымовых газов на входе в сборную железобетонную дымовую трубу $H = 30$ м, $d_0 = 1,2$ м по типовому проекту 907-2-229 [11] при сжигании: 1 – природного газа; 2 – каменного угля

Уменьшение потока влаги в стенку при увеличении температуры газов на входе в

трубу связано с тем, что при снижении температуры дымовых газов увеличивается их относительная влажность, сопротивление влагообмену снижается согласно формуле (5). Таким образом, поток пара (6) при увеличении температуры дымовых газов снижается. Эта зависимость подтверждается и графиками на рис. 7.

Заключение

Серия расчетов, выполненных для различных режимов работы рассмотренной котельной, показала, что зона конденсатообразования не может располагаться на внутренней поверхности и во внутренних слоях стенок дымовой трубы. Локализация зоны конденсатообразования в железобетонной дымовой трубе выявлена только в наружных слоях стенок во всем диапазоне режимов работы котельной.

Для стальных дымовых труб процесс диффузии влаги в стенку не происходит, поэтому влага конденсируется на внутренней поверхности трубы, следовательно коррозии подвержена верхняя часть трубы, интенсивность которой зависит от химического состава топлива. В железобетонных и кирпичных дымовых трубах область конденсации может локализоваться на любой высотной отметке в стенке трубы.

Литература

1. Хворенков Д.А., Варфоломеева Д.А. Математическое моделирование газовой динамики и теплообмена в системе дымоудаления теплоэнергетических устройств / Труды Академэнерго. 2012. № 4. С. 15–27.
2. Chi-Ming Chu, Md Mizanur Rahman, Sivakumar Kumaresan. Improved thermal energy discharge rate from a temperature-controlled heating source in a natural draft chimney // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 98. Pp. 991–1002.
3. Liang Xu, Jingqi Yuan. Thermodynamic properties calculation of the flue gas based on its composition estimation for coal-fired power plants // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. Pp. 366–375.
4. C. Chantana, Kumar S. Experimental and theoretical investigation of air-steam condensation in a vertical tube at low inlet steam fractions // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 399–412.
5. L. Yeon-Gun, J. Yeong-Jun, C. Dong-Jae, K. Sin. Experimental Investigation of Steam Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensable Gas on a Vertical Tube // Journal of Energy Engineering. 2015. Vol. 24. Iss. 1. Pp. 42–50.
6. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). М., Высшая школа, 1974. 320 с.
7. Дымовые трубы: справочное пособие / Под ред. М.Н. Ижорина. М.: Теплотехник, 2004. 496 с.
8. Хворенков Д.А., Варфоломеева О.И. К вопросу о конденсатообразовании в дымовых трубах котельных установок // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2005. № 8. С. 64–68.
9. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.
10. Bauphysik. Planung und Anwendung. Schild, Pohlenz, Casselmann, Dahmen, Ed. 4. Braunschweig: Vieweg+Teubner Verlag, 1990.
11. Типовой проект 907-2-229 Труба дымовая сборная железобетонная Н=30 м; d0=1,2 м с надземным примыканием газоходов для котельных установок. Альбом 1. Утвержден и введен в действие ВНИПИТЕПЛОПРОЕКТ. Приказ № 179 от 14.09.79 г.
12. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция взамен СНиП 23-01-99*. РФ. М.: Министерство регионального развития. 2012. 108 с.

Авторы публикации

Хворенков Дмитрий Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова. E-mail: HvorenkovDA@mail.ru.

Варфоломеева Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент, декан теплотехнического факультета Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова.

Корепанов Евгений Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоснабжение, отопление, вентиляция и кондиционирование» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова.

References

1. Khvorenkov D.A. Mathematical modeling of gas dynamics and heat transfer in the system of smoke removal of heat-energy devices. D.A. Khvorenkov, O.I. Varfolomeeva. Proceedings of Akademenergo. 2012. No. 4. Pp. 15–27.
2. Chi-Ming Chu, Md Mizanur Rahman, Sivakumar Kumaresan. Improved thermal energy discharge rate from a temperature-controlled heating source in a natural draft chimney. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 98. Pp. 991–1002.
3. Liang Xu, Jingqi Yuan. Thermodynamic properties calculation of the flue gas based on its composition estimation for coal-fired power plants. Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. Pp. 366–375.
4. C. Chantana, S. Kumar. Experimental and theoretical investigation of air-steam condensation in a vertical tube at low inlet steam fractions. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 399–412.
5. L. Yeon-Gun, J. Yeong-Jun, C. Dong-Jae, K. Sin. Experimental Investigation of Steam Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensable Gas on a Vertical Tube. Journal of Energy Engineering. 2015. Vol. 24. Iss. 1. Pp. 42–50.
6. Ilinsky V.M. Building thermophysics (enclosing structures and microclimate of buildings). M., Higher School, 1974. 320 p.
7. Chimneys: A Reference Manual. Ed. M. N. Izhorina. Moscow: Teplotekhnika, 2004. 496 p.
8. Khvorenkov D.A., Varfolomeeva O.I. On the issue of condensate formation in the chimneys of boiler plants. Sanitary Engineering. Heating. Conditioning. 2005. No. 8. P. 64–68.
9. Fokin K.F. The construction of the building is surrounded by a building. Ed. 4, revised and supplemented. M.: Stroyizdat, 1973. 287 p.
10. Bauphysik. Planung und Anwendung. Schild, Pohlenz, Casselmann, Dahmen, Ed. 4. Braunschweig: Vieweg+Teubner Verlag, 1990.
11. Model project 907-2-229. Chimney prefabricated reinforced concrete stack H=30 m; D0=1.2 m with overground flue gas connection for boiler plants. Album 1. Approved and put into operation VNIPITEPLOPROEKT. Order No. 179 of September 14, 1997.
12. SP 131.13330.2012. Set of rules. Construction climatology. Actualized edition instead of SNiP 23-01-99*. Russian Federation. M: Ministry of Regional Development. 2012. 108 p.

Authors of the publication

Khvorenkov Dmitry Anatolyevich – senior teacher, department "Heat power engineering", Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

Varfolomeeva Olga Ivanovna – Cand. Sci. (Techn.), associate professor, dean of the Heat Engineering Faculty, Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

Korepanov Evgeny Vitalievich – Cand. Sci. (Techn.), associate professor, department "Heat Supply, Heating, Ventilation and Air Conditioning", Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

Поступила в редакцию

05 октября 2017 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 697.326:62-61

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗОН ВВОДА ТВЕРДЫХ ПРИСАДОК В ВОЗДУХОВОД КОТЛА

О.С. Дмитриева¹, С.Ф. Лорай², В.Э. Зинуров¹, Э.Р. Зверева¹, М.Ф. Шагеев¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Военное представительство МО РФ, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6221-0167>, ja_deva@mail.ru

Резюме: От качества мазута существенно зависят условия работы основного и вспомогательного оборудования ТЭС. В статье рассматривается проблема улучшения процесса горения мазута и связывания образующихся при его сжигании оксидов серы за счет ввода присадок. Смоделирована часть воздуховода котла до горелок, куда вводятся частицы присадки. Исследованы области уноса частиц в воздуховоде котла для равномерного добавления присадки.

Ключевые слова: процессы горения топлива, мазут, воздуховод котла, присадка.

Благодарности: работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по договору от 14 марта 2016 г. № 14.Z56.16.5215-МК в рамках гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8.

THE DEFINITION OF THE OPTIMAL AREAS OF INPUT OF SOLID ADDITIVES INTO THE AIR INLET OF THE BOILER

O.S. Dmitrieva¹, S.F. Loraj², V.Je. Zinurov¹, Je.R. Zvereva¹, M.F. Shageev¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Military representation of the Ministry of defense of the Russian Federation,
Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6221-0167>, ja_deva@mail.ru

Abstract: The conditions of operation of the main and auxiliary equipment of TPPs essentially depend on the quality of fuel oil. The article considers the problem of improving the combustion process of fuel oil and associate produced by burning of sulfur oxides due to the introduction of additives. A part of the duct of the boiler is simulated up to the burners, where the additive particles are introduced. Areas of entrainment of particles in the duct of the boiler are investigated for uniform addition of the additive.

Keywords: the process of burning fuel, fuel oil, duct of the boiler, additive.

Acknowledgments: The reported study was funded by President of Russian Federation grant, according to the research project No. МК-5215.2016.8. (contract No. 14.Z56.16.5215-МК of 14 March 2016).

Мазут продолжает использоваться на тепловых электрических станциях в качестве котельного топлива. Повышение глубины переработки нефти приводит к ухудшению качества мазута, которое оказывает существенное влияние на условия его переработки, транспортировки, хранения и сжигания, на объем выбросов вредных веществ в атмосферу, а также на работу основного и вспомогательного оборудования тепловых электростанций. К примеру, использование высокосернистых вязких мазутов, за счет выброса больших количеств токсичных оксидов серы, приводит к загрязнению атмосферного воздуха. Кроме этого, при сгорании сера окисляется с образованием оксидов серы, которые при температуре ниже точки росы образуют серную кислоту, что является причиной коррозионных повреждений металла [1–4].

Для улучшения эксплуатационных и физико-химических свойств топлив за рубежом и в России широко используются вещества синтетического или природного происхождения – присадки. Присадки обеспечивают комплекс физико-химических свойств, необходимых для нефтяных топлив различного назначения, а также способствуют предотвращению интенсивного окисления, образования отложений и осадков, снижению износа и коррозии, улучшению вязкостно-температурных и других эксплуатационных характеристик [5–7].

Для внедрения присадок к мазуту на объектах энергетики необходимо разработать принципиальную схему дозирования. Эффективность действия твердых присадок зависит от ряда факторов: дозировки, тонкости измельчения, чистоты, характера и места ввода в котлоагрегат. Несоблюдение даже некоторых из перечисленных условий может снизить эффект применения твердых присадок.

Выбор дозировки играет весьма важную роль. Правильный выбор дозировки присадки позволит повысить эффективность ее действия [1]. В целях исключения проблем, связанных с вводом присадок, повышением эффективности их применения, разработано дозирующее устройство для равномерного добавления твердой присадки в воздухопровод котла. Сухая присадка [8] с помощью устройства вводится в воздухопровод горячего воздуха перед горелками котла.

Работа посвящена исследованию процесса ввода присадки, определению оптимальных зон в воздуховоде для её ввода, обеспечивающих отсутствие застойных зон.

Для исследования была построена 3D модель воздуховода котла (рис. 1) в программе *SolidWorks Flow Simulation*.

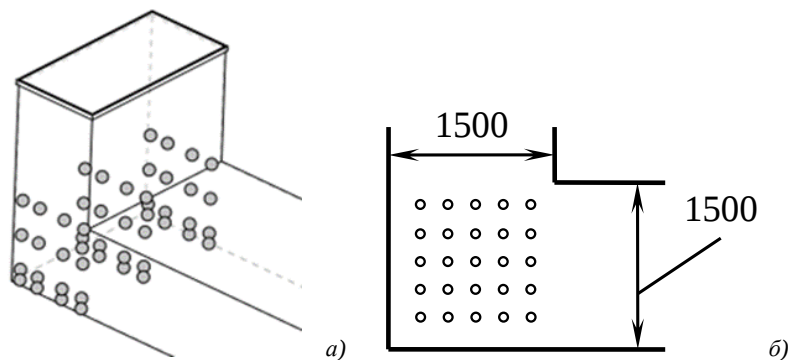


Рис. 1. Схема части воздуховода котла до горелок с частицами присадки: а – 3D модель; б – 2D модель

Целью исследования было узнать, какая группа частиц присадки из выделенной области канала уносится воздухом дальше по трубе, а какая останется, что станет причиной засорения канала, ухудшения аэродинамических характеристик. Для получения закономерностей предлагается изменять плотность и диаметр частиц, их начальную скорость в начале трубы. Также задавались некоторые постоянные параметры, обусловленные характеристикой работы котла во время промышленных испытаний обезвоженного карбонатного шлама водоподготовки на Набережночелнинской ТЭЦ ОАО «Генерирующая компания» [9], а именно: на выходе из трубы атмосферное давление 10^5 Па; массовый расход частиц 50 г/с (0,05 кг/с); начальная скорость частиц 0 м/с; температура воздуха 523,2К (250,05°C), средняя скорость газового потока $W_{cp} = 15 \div 25$ м/с. Физико-химические показатели шлама водоподготовки: диаметр частиц d_p менее 90 мкм, плотность частиц $\rho_p = 2500$ кг/м³.

Была выделена область в трубе в виде квадрата размером 1500×1500 мм (рис. 1, б). Введем относительные координаты $Y = y/1500$, $X = x/1500$, вертикальную и горизонтальную соответственно. На рис. 2–4 в графическом виде показаны результаты исследований областей уноса частиц в канале подачи воздуха в котел. Некоторые линии на графиках не доходят до оси абсцисс, т.к. линия двигается дальше, но упирается в исследуемую область канала.

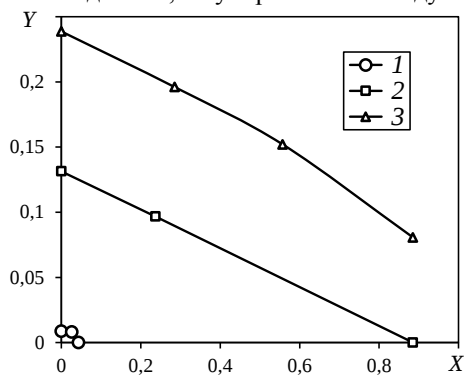


Рис. 2. Область уноса частиц в канале подачи воздуха в котел при $W_{cp} = 10$ м/с, $\rho_p = 2000$ кг/м³, d_p мкм: 1 – 100; 2 – 150, 3 – 200

Рис. 2 показывает, что диаметр частиц присадки оказывает существенное влияние на область уноса. Частицы диаметром менее 100 мкм будут практически полностью уноситься вверх по воздуховоду из-за того, что сила аэродинамического сопротивления частиц значительно превосходит силу тяжести, действующую на них. Для частиц больших размеров область уноса достаточно большая, что необходимо учитывать при проектировании дозирующих устройств для ввода частиц в поток.

Увеличение плотности частиц также приводит к существенному увеличению области уноса. Исследования показали (рис. 3), что увеличение плотности с 2000 до 4000 кг/м³ сказывается на расширении области уноса более чем в 10 раз. Дальнейшее увеличение плотности приводит к росту области уноса гораздо меньшими масштабами.

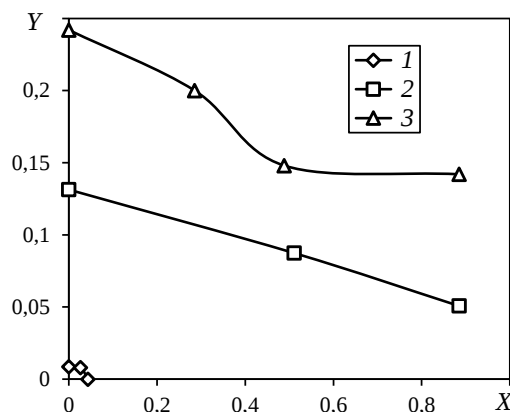


Рис. 3. Область уноса частиц в канале подачи воздуха в котел при $W_{cp} = 10$ м/с, $d_p = 100$ мкм, ρ_p , кг/м³: 1 – 2000; 2 – 4000; 3 – 7000

Результаты исследований показали (рис. 4), что снижение скорости до значений менее 5 м/с приводит к резкому увеличению области уноса. Частицы присадки, находящиеся под кривой (рис. 4 линия 1), падают вниз и остаются в воздуховоде. И наоборот, частицы, находящиеся над линией, уносятся в вверх. В тоже время в рабочих режимах, где скорости более 10 м/с, влияние скорости потока воздуха весьма незначительно, частицы присадки уносятся воздухом вверх по трубе полностью.

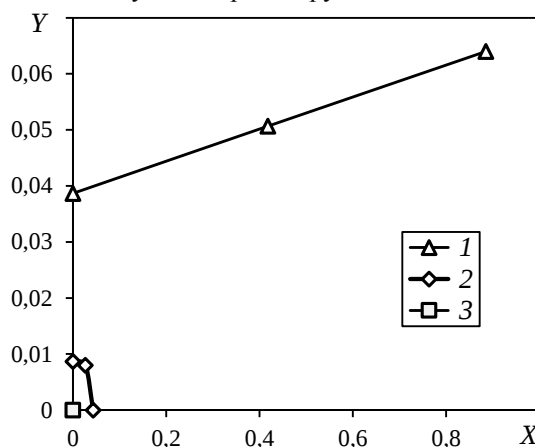


Рис. 4. Область уноса частиц в канале подачи воздуха в котел при $d_p = 100$ мкм, $\rho_p = 2000$ кг/м³, W_{cp} , м/с: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20

Таким образом, в работах [9; 10] показано, что присадка обладает наибольшей эффективностью при размере частиц менее 90 мкм, следовательно при рабочих скоростях потока воздуха по каналу все введенные частицы будут подниматься вверх. Согласно результатам испытаний происходит снижение массовой доли оксидов серы в дымовых газах на 36,5%, присадка способствует химическому связыванию серы, содержащейся в мазуте, при его горении, в результате уменьшаются выбросы оксидов серы в атмосферу. При корректных расчетах возможно спроектировать систему подачи присадки в воздуховод, которая будет работать достаточно надежно и эффективно.

Литература

1. Kannaiyan K., Sadr R. The effects of alumina nanoparticles as fuel additives on the spray characteristics of gas-to-liquid jet fuels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017. V. 87. P. 93–103.

DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.04.027.

2. Митусова Т.Н., Любименко В.А., Недайборщ А.С. Исследование совместимости присадок различного функционального назначения к дизельным топливам методом компьютерного моделирования. Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2015. № 5. С. 32–36.

3. Зиганшин М.Г., Ежов П.В., Дмитриев А.В. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа // Промышленная энергетика. 2008. № 9. С. 49–53.

4. Калимуллин И.Р., Дмитриев А.В. Перспективы использования абсорбентов на основе третичных аминов для повышения эффективности очистки газов в аппаратах высокой пропускной способности // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 3. С. 143–145.

5. Saidakhmedov A.I., Karpov S.A., Kapustin V.M. Effect of cottonseed oil additives and etherification products on diesel fuel properties. Chemistry and technology of fuels and oils. 2011. V. 47. № 5. P. 331–336. DOI: 10.1007/s10553-011-0303-2.

6. Данилов А.М. Развитие исследований в области присадок к топливам (обзор) // Нефтехимия. 2015. Т. 55, № 3. С. 179. DOI: 10.7868/S0028242115030028.

7. Капустин В.М. Нефтяные и альтернативные топлива с присадками и добавками. М.: КолосС, 2008. 232 с.

8. Пат. 2363722 РФ. МПК C10L 1/12. Присадка к мазуту / Зверева Э.Р., Ганина Л.В. заявл. 02.10.2007. Опубл. 10.08.2009. Бюл. № 22.

9. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахметвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 50–56. DOI: 10.1134/S0040363617080112

10. Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Zueva O.S. Nano additives influence on fuel oil properties. Solid state phenomena. 2017. V. 265. P. 374–378. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.374.

Авторы публикации

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ja_deva@mail.ru.

Лорай Сергей Федорович – начальник 744 Военного представительства МО РФ в г. Казани.

Зинуров Вадим Эдуардович – магистрант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Зверева Эльвира Рафиковна – докт. техн. наук, профессор кафедры «Технология воды и топлива» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шагеев Марат Фаридович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Kannaiyan K., Sadr R. The effects of alumina nanoparticles as fuel additives on the spray characteristics of gas-to-liquid jet fuels. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. V. 87. P. 93-103. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.04.027.

2. Mitusova T.N., Lyubimenko V.A., Nedayborshch A.S. Issledovanie sovmestimosti prisadok razlichnogo funktsional'nogo naznachenija k dizel'nyim toplivam metodom komp'yuternogo modelirovanija [Study of the compatibility of the additives of different functional designation to the diesel fuel by the computer simulation method] // Neftepererabotka i neftehimija. Nauchno-tehnicheskie dostizhenija i

peredovoj opyt. 2015. issue 5. pp. 32–36.

3. Ziganshin M.G., Ezhov P.V., Dmitriev A.V. Jefferktivnost' ochistki gazovyh vybrosov parogeneratorov TJeS v apparatah vihrevogo tipa [Efficiency of cleaning gas emissions of TPP steam generators in vortex-type devices] // Promyshlennaja jenergetika. 2008. issue 9. pp. 49–53.

4. Kalimullin I.R., Dmitriev A.V. Perspektivy ispol'zovanija absorbentov na osnove tretichnyh aminov dlja povyshenija jefferktivnosti ochistki gazov v apparatah vysokoj propusknoj sposobnosti [Prospects for the use of tertiary amine based absorbents to improve the efficiency of gas cleaning in high-throughput devices]. Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2011. issue 3. pp. 143–145.

5. Saidakhmedov A.I., Karpov S.A., Kapustin V.M. Effect of cottonseed oil additives and etherification products on diesel fuel properties. Chemistry and technology of fuels and oils. 2011. V. 47. issue 5. pp. 331–336. DOI: 10.1007/s10553-011-0303-2.

6. Danilov A.M. Razvitie issledovanij v oblasti prisadok k toplivam (obzor) [Progress in research on fuel additives (review)] // Neftehimija. 2015. V. 55. issue 3. p. 179. DOI: 10.7868/S0028242115030028.

7. Kapustin V.M. Neftjanye i al'ternativnye topliva s prisadkami i dobavkami [Oil and alternative fuels with additives and additives]. Moscow. KolosS, 2008. 232 p.

8. Zvereva Je.R., Ganina L.V. Pat. 2363722 RF. Prisadka k mazutu [Additive for fuel oil]. Izobretenija. Poleznye modeli. 2009. issue 22. (Publ. 10 august 2009).

9. Zvereva Je.R., Dmitriev A.V., Shageev M.F., Ahmetvalieva G.R. Rezul'taty promyshlennyh ispytanij karbonatnoj prisadki k mazutu [Results of industrial tests of carbonate additive to fuel oil] // Teplojenergetika. 2017. issue 8. pp. 50–56. DOI: 10.1134/S0040363617080112.

10. Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Zueva O.S. Nano additives influence on fuel oil properties. Solid state phenomena. 2017. V. 265. P. 374–378. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.374.

Authors of the publication

Oksana S. Dmitrieva – Cand. Sci. (Techn.), senior researcher, Department “Theoretical Foundations of Thermal Engineering”, Kazan State Power Engineering University.

Sergey F. Loraj – chief of 744 Military representation of the Ministry of defense of the Russian Federation in Kazan.

Vadim Je. Zinurov – student of Kazan State Power Engineering University.

Jelvira R. Zvereva – Dr. Sci. (Techn.), professor, Department “Water and fuel technology”, Kazan State Power Engineering University.

Marat F. Shageev – Cand. Sci. (Techn.), associate professor, Department of “Electric stations”, Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

12 мая 2017 г.

ФИЗИКА

УДК 539.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА CFD

Д.А. Губайдуллин, П.П. Осипов, И.М. Альмакаев

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН,
г. Казань, Россия

Резюме: Исследован дрейф частиц в плоском прямоугольном акустическом резонаторе средствами CFD-пакета Fluent. Изучено влияние коэффициента увлечения и размеров частиц на их распределение в резонаторе. Установлено, что частицы дрейфуют в сторону стенок. Численные расчеты выявили места повышенной концентрации частиц, так называемые акустические ловушки в резонаторе.

Ключевые слова: Акустическое течение, резонатор, дрейф частиц, акустические ловушки, Fluent.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-11-10016).

MODELING OF THE FINE PARTICLES DRIFT IN ACOUSTIC RESONATOR USING CFD-PACKAGE

D.A. Gubaidullin, P.P. Osipov, I.M. Almakaev

Institute of Mechanics and Engineering
Kazan Science Center RAS, Kazan, Russia

Abstract: The particles drift in closed tuberesonator by the influence of viscous drag force using CFD package was considered. On the left bound of resonator gas velocity oscillates harmonically at the first resonant frequency. The four vortices of Schlichting in boundary layer and four vortices of Rayleigh were shown. The particles by the influence of its own drift and acoustic flow accumulate on the ends of the tube. Maximum particle drift near the boundary between vortices was observed. Comparison of the results with other author results shows satisfactory accuracy.

Keywords: acoustic flow, resonator, particle drift, CFD-package Fluent.

Acknowledgments: The research was performed with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 15-11-10016).

Введение

При сепарации и очистке газа, в медицинских приборах диагностики и исследования применяются волновые поля. При рассмотрении динамики дисперсной частицы в таких полях необходимо учитывать волновую силу [1], которая приводит к дрейфу частицы. Подробное описание динамики одиночной дисперсной частицы в волновых полях

приведено в [2]. Ряд работ посвящен исследованию одномерного дрейфа частиц в различных акустических полях. В работе [3] методом Ван-дер-Поля получена формула для ускорения дрейфа твердой частицы в поле стоячей волны под действием силы Стокса, динамической силы Архимеда и силы присоединенных масс. Из этой формулы следует, что крупные частицы, для которых силы Архимеда и присоединенных масс доминируют над силой Стокса, дрейфуют к пучности стоячей волны скорости. Напротив, мелкие частицы, для которых доминирует сила Стокса, дрейфуют к узлам волны скорости. Полученная формула устанавливает существование пороговой частоты и порогового радиуса частицы, при переходе через которые волновая сила и ускорение дрейфа меняют свое направление. Работа [4] обобщает работу [3] на случай сжимаемости частицы и несущей среды. Построена диаграмма направлений дрейфа. В [5] численно исследован дрейф несжимаемой частицы в акустическом резонаторе при наличии периодической ударной волны. Исследовано влияние основных гидродинамических сил на направление дрейфа частицы. Установлено пороговое значение радиуса частиц, при котором определяется направление дрейфа. В [6] исследован дрейф частицы в стоячей волне при различных числах Рейнольдса и Струхала. Предложена универсальная диаграмма пороговых кривых при разных режимах обтекания частицы. В работе [7] численно изучено влияние силы Бассэ на направление дрейфа в стоячей волне. Показано, что учет силы Бассэ оказывает сильное влияние на пороговые кривые для неплотных частиц. В [8] численно исследован вопрос о скорости дрейфа частиц при различных числах Маха и Рейнольдса. На основе уравнения Ланжевена введено понятие локально-равновесной скорости дрейфа частицы. Установлено влияние положения частицы и коэффициента увлечения частицы на скорость дрейфа в стоячей и периодической ударной волне. Выведена формула для коэффициента увлечения, при котором скорость дрейфа частицы достигает максимума. Установлено, что при малых и больших коэффициентах увлечения скорость дрейфа частицы стремится к нулю. Показано, что при одинаковых условиях максимальная скорость дрейфа частицы в стоячей волне на 1–2 порядка меньше чем в периодической ударной волне.

Ряд работ посвящен исследованию дрейфа в двумерных областях, где волновые поля могут приводить к возникновению акустических течений. Например, стоячие волны могут приводить к развитию пристеночных вихрей Шлихтинга и вихрей Рэлея [9]. Наличие акустического течения дополнительно переносит дисперсные частицы. При отсутствии акустических течений малая (стоксова) частица в стоячей волне дрейфует к узлам под действием волновой силы (собственный дрейф). При наличии акустического течения на собственный дрейф частицы накладывается перенос этим течением, что может изменить результирующее направление дрейфа. Численное решение плоской задачи дрейфа частиц при стоксовом режиме представлено в работе [10], где приведены характерные распределения частиц вдоль оси трубы при различных режимах возбуждения колебаний. В работе [11] методом характеристик численно исследован дрейф группы мелкодисперсных частиц в плоском резонаторе с учетом вихрей Шлихтинга и Рэлея. Изучено влияние размеров частиц на их пространственное распределение в резонаторе. Обнаружены области акустического захвата частиц, в которых собственный дрейф частиц уравнивается акустическим течением.

Несмотря на большое количество работ, недостаточно изучено влияние коэффициента увлечения частиц, частоты колебания и свойств несущей среды на возникновение акустических ловушек. Для изучения вопроса о распределении дисперсных частиц в акустических полях ввиду сложности математической модели, в настоящей работе используется CFD–пакет *Ansys Fluent* [12].

Постановка задачи

Рассматривается нестационарная задача о дрейфе равномерно распределенных мелкодисперсных частиц в плоском прямоугольном акустическом резонаторе длиной L и

высотой H . На левой границе резонатора $x=0$ задана скорость газа $u = U_0 \sin \omega t$, $v = 0$ при первой резонансной частоте $\omega = \pi c_0 / L$, где $c_0 = \sqrt{\gamma R T_0}$ – невозмущенная скорость звука, $U_0 = x_0 \omega$ – амплитуда колебаний скорости газа, x_0 – амплитуда колебаний. На правой, нижней и верхней границе заданы условия прилипания $u = 0, v = 0$. Для давления и температуры на всех границах наложены однородные условия Неймана $\partial p / \partial n = 0$, $\partial T / \partial n = 0$.

Математическая модель динамики вязкого, сжимаемого и теплопроводного газа описывается уравнениями сохранения массы, импульса, энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(e+p)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(e+p)v] &= \frac{\partial}{\partial x} [u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + k \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + k \frac{\partial T}{\partial y}] \end{aligned}$$

и двумя замыкающими соотношениями

$$\begin{aligned} p &= (\gamma - 1) (e - 0.5 \rho (u^2 + v^2)) \\ p &= \frac{T}{\rho R} \end{aligned}$$

где t – время, u, v – компоненты вектора скорости газа, p – давление, ρ – плотность газа, e – полная энергия в единице объема, T – температура газа, $\gamma = 1.4$ – коэффициент адиабаты для воздуха, $k = 0.0242 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности газа, $R = 287.6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – удельная газовая постоянная.

Компоненты тензора касательных напряжений:

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad \tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad \tau_{xy} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

где μ – динамическая вязкость газа.

В начальный момент времени несущая среда находится в состоянии покоя:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad p = p_0, \quad T = T_0$$

Скорость акустического течения $(\bar{u}, \bar{v})$ вычисляется осреднением скорости несущей среды по периоду колебаний поршня $T = 2\pi/\omega$:

$$\bar{u} = \frac{1}{T_\omega} \int_{t_k}^{t_{k+1}} u(x, y, t) dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{T_\omega} \int_{t_k}^{t_{k+1}} v(x, y, t) dt, \quad k = (0, 1, 2, \dots)$$

В случаях малых массовых концентраций и размеров частиц можно пренебречь их обратным воздействием на скорость газа. Тогда математическая модель движения дисперсной частицы сводится ко 2-закону Ньютона. Полная система уравнений движения несжимаемой сферической частицы под действием силы Стокса примет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx_p}{dt} &= u_p, & \frac{du_p}{dt} &= -\frac{u_p - u}{\tau_v} C_D \frac{\text{Re}_p}{24} \\ \frac{dy_p}{dt} &= v_p, & \frac{dv_p}{dt} &= -\frac{v_p - v}{\tau_v} C_D \frac{\text{Re}_p}{24}\end{aligned}$$

Где x_p, y_p – координаты центра сферической частицы, u_p, v_p – компоненты скорости частицы, $\tau_v = \frac{2}{9} \frac{r_p^2 \rho_p}{\mu}$ – время релаксации частицы, т.е. время, необходимое для достижения скорости несущей среды, r_p, ρ_p – радиус и плотность частицы. В пакете Fluent коэффициент сопротивления для сферической частицы C_D определяется эмпирическим соотношением в зависимости от числа Рейнольдса.

$$\text{Re} = \frac{2\rho_p r_p \sqrt{(u - u_p)^2 + (v - v_p)^2}}{\mu}, \quad C_D = \begin{cases} 0.44, & \text{Re}_p > 1000 \\ \frac{24}{\text{Re}_p} \left(1 + \frac{\text{Re}_p^{2/3}}{6} \right), & \text{Re}_p < 1000 \end{cases}$$

В начальный момент времени частицы равномерно распределены по резонатору и каждая частица находится в состоянии покоя: $u_p(0) = 0, v_p(0) = 0$. Скорость несущей среды и её плотность берутся из решения задачи динамики газа.

Численное решение

Для численного решения данной задачи использовался программный комплекс *Ansys Fluent*, основанный на методе конечных объемов. Данный вычислительный пакет позволяет решать двумерные, осесимметричные и трехмерные задачи в стационарной или нестационарной постановке при разных режимах течения жидкости. Содержит различные численные модели для решения задач газовой динамики, для процессов таких, как теплопередача, кавитация, фазовые переходы, акустика и др. Для задания в расчете специфических условий могут быть применены *UDF*–функции (*User Defined Function*), задаваемые пользователем. Например, в данной работе использовалась функция *DEFINE_PROFILE* для задания гармонического граничного условия на левой стенке резонатора, *DEFINE_EXECUTE_AT_END* – для обработки характеристик динамики газа после каждого шага по времени и функция *DEFINE_ON_DEMAND* для инициализации переменных расчета.

Для решения уравнений динамики газа использовался алгоритм *PISO* (*Pressure Implicitwith Splittingof Operator*). Пространственная дискретизация плотности, скорости и энергии проводилась по схеме *MUSCL* (*Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws*) 3–порядка, давления – *UPWIND* 2–порядка. Для дискретизации по времени была использована также схема *UPWIND* 2–порядка. Для правильного разрешения пограничных слоев акустического течения [13] генерировалась расчетная сетка, шаг по вертикали которой выбирался из условия: $\Delta y_{\min} / \delta < 0.1$, где $\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$ – толщина

акустического пограничного слоя. Шаг по времени вычислялся из условия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви: $c_0 \Delta t (1/\Delta x + 1/\Delta y) < CFL = 0.5$.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений движения дисперсных частиц решалась неявным методом Эйлера 2-порядка.

Результаты

Расчеты проводились при следующих параметрах:

$$L = 0.008825 \text{ м}; \varepsilon = H/L = 0.0358; x_0 = 10^{-5} \text{ м}; p_0 = 101325 \text{ Па}$$

$$T_0 = 296 \text{ К}; c_0 = 344 \text{ м/с}; \omega = \pi/(c_0 L) \approx 125000 \text{ рад/с};$$

$$f = \omega/2\pi \approx 19.9 \text{ кГц}; \mu = 1.935 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}; \rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

На рис.1 и рис.2 изображены профили безразмерных величин горизонтальной компоненты скорости u/U_0 и перепада давления $\Delta p/p_0 = p/p_0 - 1$ вдоль оси симметрии резонатора $y = H/2$ в различные фазы периода колебаний $\omega = (0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$. В начальный момент времени несущая среда находится в состоянии покоя. При первой резонансной частоте ω через определенное количество периодов в резонаторе образуется волна близкая к стоячей волне. Она со временем деформируется из-за резонанса и начинает опрокидываться. В начале и середине цикла профиль скорости достигает наибольшего по модулю значения. Давление газа достигает своего наибольшего значения на границах резонатора при фазах $\pi/2$ и $3\pi/2$. На этих фазах профили давления симметричны относительно середины $L/2$ резонатора. Заметим, что узлы скорости остаются все время на концах резонатора, в то время как узлы давления смещаются по оси x .

В данной работе также проводится сравнение с результатами, полученные в [11] методом характеристик для модели без уравнения энергии. Видно, что в областях, где происходит опрокидывание волны, имеются небольшие расхождения. Это может быть связано с различием математических моделей.

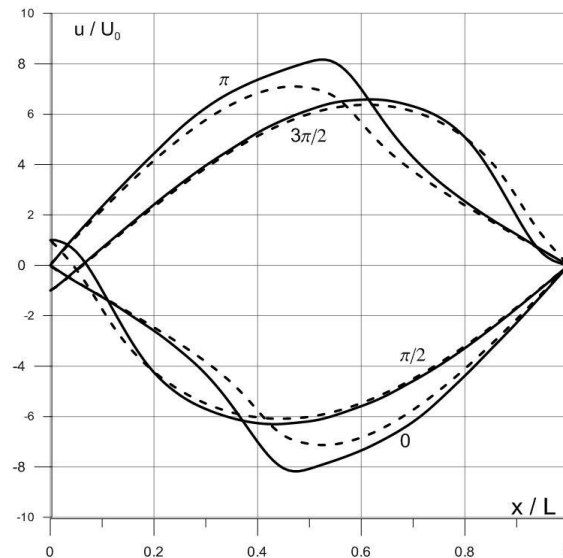


Рис.1. Распределения продольной скорости газа на оси симметрии для фаз $\omega = (0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ после сотого периода: пунктирная – FLUENT; сплошная – метод характеристик [11].

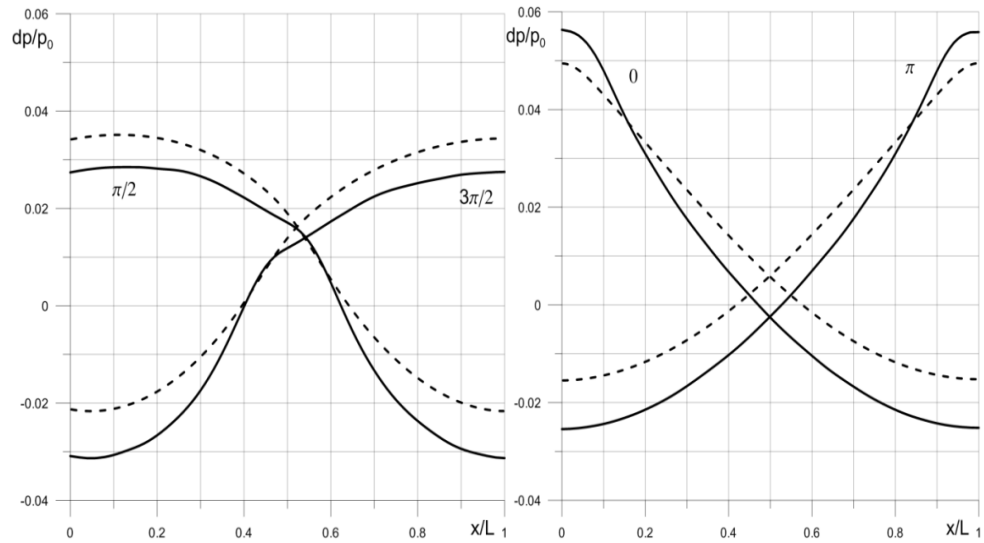


Рис.2. Распределения давления газа вдоль оси симметрии для фаз $\omega = (0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ после сотого периода: пунктирная– FLUENT; сплошная – метод характеристик [11].

На рис.3 сопоставлен график продольной мгновенной скорости u/U_0 в точке $(L/2, H/2)$ с методом характеристик, где видно, что примерно через 10 периодов амплитуда колебаний скорости выходит на стационарное значение.

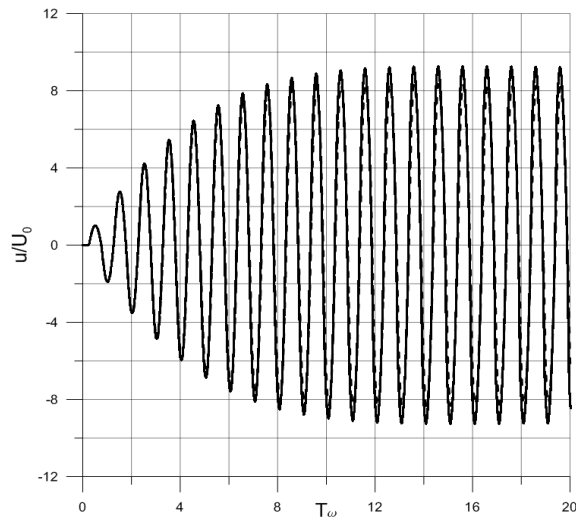


Рис.3.Продольная скорость u/U_0 газа в точке $(L/2, H/2)$: пунктирная– FLUENT; сплошная – метод характеристик [11].

При колебательных движениях на резонансных частотах в вязкой среде возникают вихревые движения – вихри Шлихтинга в тонком пограничном слое (ПС) и вихри Рэлея в ПС [14]. Вихри Шлихтинга обязаны своим происхождением вязкости несущей среды, в то время как вихри Рэлея, возникают в результате взаимодействия с вихрями пограничного слоя. Вращение вихрей Шлихтинга происходит в направлении, противоположном вращению вихрей Рэлея. На рис.4 изображен профиль скорости акустического течения $\bar{u}$ по

высоте H в сечении $3L/4$ резонатора. По оси абсцисс отложена безразмерная величина горизонтальной компоненты акустической скорости $u^* = \bar{u}/U_0$, где $u_R = 3U_m^2/16c_0$ – максимальная скорость акустического течения, индуцированного стоячей синусоидальной волной вдоль плоского резонатора, $U_m \approx 10$ м/с – максимальное значение амплитуды колебаний скорости газа. Видно, что образуется параболический профиль продольной компоненты скорости акустического течения, где смена знака свидетельствует о вихреобразном течении. Причем скорость достигает максимальных значений на границах взаимодействия вихрей Шлихтинга и Рэлея.

Динамика частиц. Взвешенные в газе частицы под действием сил сопротивления вовлекаются в колебательное движение. В зависимости от частоты, амплитуды, плотности несущей среды, а также размера, массы и положения частицы в стоячей волне зависит направление и скорость дрейфа. В работах, где исследуется дрейф частиц, рассматривается безразмерная величина $\mu_p = 1/\sqrt{1 + (\omega \tau_v)^2}$ – коэффициент увлечения частицы несущей средой.

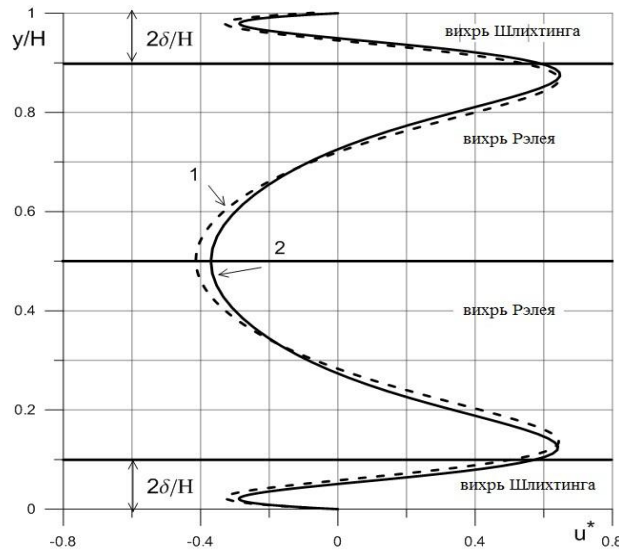


Рис.4. Распределение продольной скорости акустического течения $\bar{u}$ по высоте резонатора в поперечном сечении $3L/4$ после сотого периода.

(1 – FLUENT, 2 – метод характеристик).

В данной работе рассматривались частицы с коэффициентом увлечения $\mu_p = 0.74$, при котором достигается максимальная скорость дрейфа в стоячей волне [8], и для сравнения $\mu_p = 0.27$. На рис.5и рис.6представлены распределения частиц после 2000 периодов. В начальный момент частицы равномерно распределены по области резонатора с нулевыми скоростями. Далее, под влиянием собственного дрейфа и переноса акустическим течением частицы покидают среднюю часть резонатора и скапливаются на концах. Максимальный перенос частиц акустическим течением происходит в области соприкосновения вихрей Шлихтинга и Рэлея.

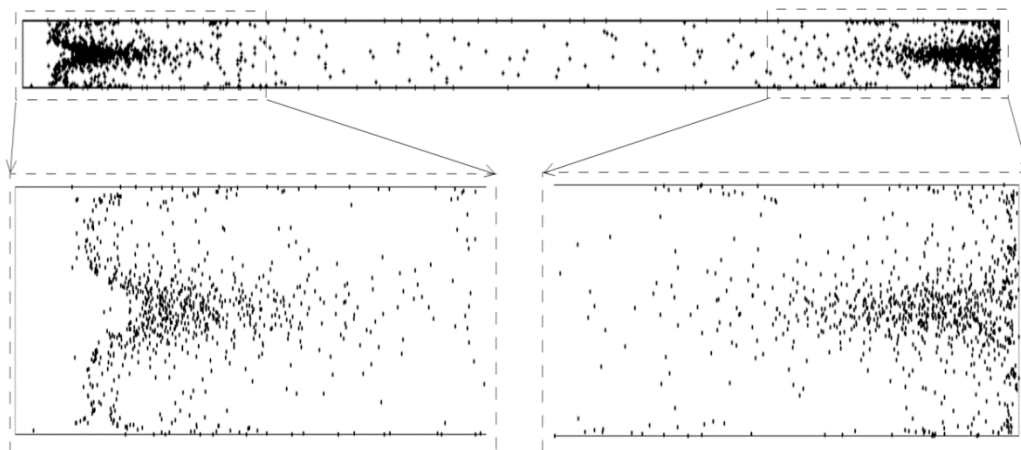


Рис.5. Распределение частиц при $\mu_p = 0.74$ ($r_p = 7 \cdot 10^{-7}$ м) после 2000 периодов.

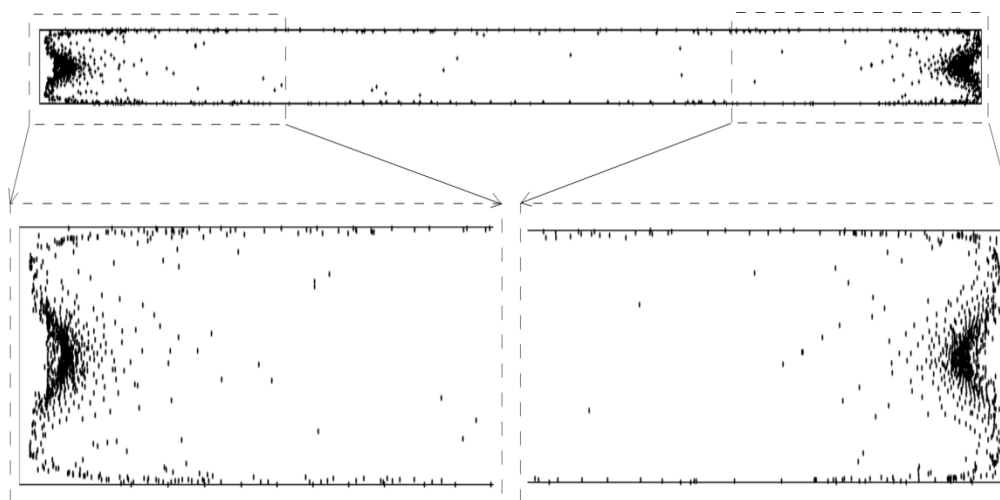


Рис.6. Распределение частиц при $\mu_p = 0.27$ ($r_p = 13 \cdot 10^{-7}$ м) после 2000 периодов.

Вблизи левой и правой границы возникают области акустического захвата частиц (ловушка), что совпадает с результатами работы [11]. Концентрация частиц в ловушке начинает смещаться к центру по мере приближения к плоскости симметрии резонатора. На удаление частиц от границы влияет коэффициент увлечения частиц μ_p . Чем больше μ_p , тем дальше от поршня располагаются частицы.

Заключение

Полученные результаты подтверждают, что максимальный перенос частиц акустическим течением происходит в областях соприкосновения вихрей Шлихтинга и Рэлея. Показано, что вблизи левой и правой границы резонатора возникают области захвата частиц — акустические ловушки. Концентрация частиц в акустической ловушке увеличивается по мере приближения к плоскости симметрии резонатора. На местоположение акустической ловушки влияет коэффициент увлечения частиц μ_p . Чем больше значение μ_p , тем дальше от поршня располагаются частицы.

Для оценки достоверности результаты численного моделирования на пакете Fluent сопоставлены с результатами, полученными в [11] методом характеристик для модели без уравнения энергии. Сравнены эпюры продольной мгновенной скорости и давления газа в различные фазы колебания. Приведено сравнение эпюр продольной скорости акустического течения. Эти сравнения показали удовлетворительную согласованность результатов, поэтому для решения задач дрейфа частиц в акустических полях, может быть эффективно использован CFD-пакет Fluent.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-11-10016).

Литература

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. - Москва: R&C Dynamics, 2008. - 712 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - Москва: Наука. 1978. Часть I, 464 с. Часть II, 360 с.
3. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П. Влияние гидродинамических сил на дрейф включения в волновых полях// Проблемы энергетики. - 2010. - Ч.1-2. - С.3-13.
4. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П. О некоторых режимах дрейфа включений в акустических полях// Инженерно-физический журнал. - 2011. - Т. 84. - №2. - С.255-262.
5. Gubaidullin D.A., Ossipov P.P. Numerical investigation of particle drift in acoustic resonator with periodic shock wave// Applied mathematics and computation. - 2013. - №219. - P. 4535-4544.
6. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П. Влияние чисел Рейнольдса и Струхала на направление волновой силы, действующей на включения в стоячей синусоидальной волне// Инженерно-физический журнал. - 2013. - Т. 86. - № 1. - С.50-58.
7. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П., Закиров А.Н. Диаграммы направления дрейфа частицы в стоячей волне с учетом силы Бассэ// Инженерно-физический журнал. - 2015. - Т.88. - №3. - С. 601-608.
8. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П., Насыров Р.Р. Влияние положения частицы и коэффициента увлечения на скорость дрейфа в акустическом резонаторе// Инженерно-физический журнал. - 2016. - Т. 89. - №2. - С. 400-406.
9. Aktas M.K., Farouk B. Numerical simulation of acoustic streaming generated by finite-amplitude resonant oscillations in an enclosure// J.Acoust. Soc. Am.- 2004. - V. 116. -P. 2811-2831.
10. Тукмаков А.Л. Распределение твердых частиц в акустическом поле резонансной трубы при различных режимах возбуждения колебаний// Теплофизика и аэромеханика. - 2005. - Т.12. - №2. - С.219-227.
11. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П., Насыров Р.Р. Моделирование акустического захвата мелкодисперсных частиц в двумерном резонаторе // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 25-летию ИММ КазНЦ РАН. - Казань: ФЭН, 2016. - С. 130-145.
12. [Электронный ресурс] ANSYS Fluent: CFD Simulation // URL: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
13. Gubaidullin D.A., Osipov P.P., Nasyrov R.R. Numerical simulation of Schlichting streaming induced by standing wave in rectangular enclosure// LTP Coatings 2014 IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 567 (2014) 012017 doi:10.1088/1742-6596/567/1/012017.
14. Зарембо Л.К., Красильников В.А Введение в нелинейную акустику. - Москва: Наука, 1966. - 521 с.

Авторы публикации

Губайдуллин Дамир Анварович – д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН, директор Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН. E-mail: gubajdullin@mail.knc.ru.

Осипов Петр Петрович – д-р физ.-мат. наук, в.н.с. Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН. E-mail: petro300@rambler.ru.

Альмакаев Ильдар Маратович – аспирант Института Механики и Машиностроения Казанского Научного Центра РАН. E-mail: ildar.almakayev@gmail.com.

References

1. Ganiev, RF, and Ukrainsky, L. Nonlinear wave mechanics and technology. - Moscow: R & C Dynamics, 2008. - 712 p.
2. Nigmatulin RI Dynamics of multiphase media. - Moscow: Science. 1978. Part I, 464 p. Part II, 360 sec.
3. Gubaidullin DA, Osipov P.P. Influence of hydrodynamic forces on drift of inclusion in wave fields // Problems of power engineering. - 2010. - Part 1-2. - C.3-13.
4. Gubaidullin DA, Osipov P.P. On some modes of drift of inclusions in acoustic fields // Engineering and Physics Journal. - 2011. - T. 84. - №2. - P.255-262.
5. Gubaidullin D.A., Ossipov P.P. Numerical investigation of particle drift in an acoustic resonator with periodic shock wave // Applied mathematics and computation. - 2013. - №219. - P. 4535-4544.
6. Gubaidullin DA, Osipov P.P. Influence of the Reynolds and Strouhal numbers on the direction of the wave force acting on inclusions in a standing sinusoidal wave // Engineering and Physics Journal. - 2013. - T. 86. - No. 1. - C.50-58.
7. Gubaidullin DA, Osipov PP, Zakirov A.N. Diagrams of the drift direction of a particle in a standing wave with allowance for the Basset force // Engineering-Physics Journal. - 2015. - T.88. - No. 3. - C. 601-608.
8. Gubaidullin DA, Osipov PP, Nasyrov RR Influence of the position of the particle and the drag coefficient on the drift velocity in an acoustic cavity // Engineering and Physics Journal. - 2016. - T. 89. - № 2. - C. 400-406.
9. Aktas M.K., Farouk B. Numerical simulation of the acoustic streaming generated by the finite-amplitude resonant oscillations in the enclosure // J.Acoust. Soc. Am. - 2004. - V. 116.-P. 2811-2831.
10. Tukmakov A.L. Distribution of solid particles in the acoustic field of a resonant tube under various oscillation modes // Thermophysics and Aeromechanics. - 2005. - T.12. - №2. - P.219-227.
11. Gubaidullin DA, Osipov PP, Nasyrov RR Modeling of acoustic capture of finely dispersed particles in a two-dimensional resonator // Actual problems of continuum mechanics. To the 25th anniversary of IMM KazNTs RAS. - Kazan: Feng, 2016. - P. 130-145.
12. [Electronic resource] ANSYS Fluent: CFD Simulation // URL: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
13. Gubaidullin D.A., Osipov P.P., Nasyrov R.R. Numerical simulation of Schlichting flowing induced by standing wave in a rectangular enclosure // LTP Coatings 2014 IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series567 (2014) 012017 doi: 10.1088 / 1742-6596 / 567/1/012017.
14. Zarembo LK, Krasilnikov VA Introduction to nonlinear acoustics. - Moscow: Science, 1966. - 521 p.

Authors of the publication

Gubaidullin Damir Anvarovich– Corresponding Member of the RAS, director of the Institute of Mechanics and Engineering, Russian Academy of Sciences.

Osipov Petr Petrovich– doctor of phys.-math. sciences, Institute of Mechanics and Engineering, Russian Academy of Sciences.

Almakaev Ildar Maratovich– researcher of theInstitute of Mechanics and Engineering, Russian Academy of Sciences.

Поступила в редакцию

13 июля 2017 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ КАК «ВИХРЕВОЙ ЗАСЫПКИ»

Л.Э. Меламед¹, Г.А. Филиппов²

¹Закрытое акционерное общество «Центр физико-технических проектов
«Атомэнергомаш», г. Москва, Россия

²Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
Российской академии наук, г. Москва, Россия
lev.melamed@yandex.ru

Резюме: Предложен новый метод моделирования и исследования турбулентного течения, основанный на представлении о турбулентности как о течении через «вихревую засыпку». Для его реализации применен предложенный ранее метод локальных флуктуаций, который позволяет аналитически описывать и задавать в компьютерных расчетах структуру среды, насыщенной включениями. На основе полученного ранее уравнения движения для турбулентного течения найден профиль внутреннего сопротивления турбулентного потока. Показано, что именно такой профиль средней вязкости потока с включениями, имитирующими вихревые трубки, является причиной перестройки профиля скорости из ламинарного в турбулентный. Этот подход позволяет заменить достаточно сложный расчет турбулентного течения более простым расчетом ламинарного течения с флуктуациями, моделирующими вихревую засыпку. На основе предложенного метода построена расчетная модель «вихревой засыпки», позволяющая рассчитывать и анализировать турбулентное течение в трубах.

Ключевые слова: турбулентность, моделирование, вихревая засыпка, локальные флуктуации, внутреннее сопротивление.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, проект № 15-08-00442а).

SIMULATION OF TURBULENCE AS A «VORTEX BACKFILL»

L.E.Melamed¹, G.A.Filippov²

¹Closed joint-stock company «Centre of physic technical designs "Atomenergomash",
Moscow, Russia

²Department of power, mechanical engineering, mechanics and control processes of Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia
lev.melamed@yandex.ru

Abstract: The new method of simulation and the turbulent flow research, based on representation about turbulence as a current through «vortex backfill» is offered. The method of local fluctuations offered earlier is applied to its realization. This method allows to describe and assign analytically in computer calculations the structure of the medium filled with inclusions. On the basis of the equation of movement for turbulent flow in the pipes, offered earlier, the profile of interior resistance of a turbulent stream is received. It is shown that gained on its basis the profile of mean viscosity of stream with the inclusions simulating the vortex tubes, reconstructs the profile of velocity from laminar to turbulent. This approach allows to change rather complex calculation of

turbulent flow with more simple laminar flow with fluctuations, simulating the «vortex backfill». The calculated model of «vortex backfill» is constructed, allowing to calculate and analyze turbulent flow in pipes.

Keywords: turbulence, simulation, the vortex backfill, fluctuations, interior resistance.

Acknowledgments: This work is fulfilled with financial support of the Russian fund of basic researches (RFFI, the project № 15-08-00442a).

Введение

Турбулентность – одно из самых сложных физических явлений, имеющих место в технических приложениях, в том числе и в энергетике. При этом наиболее распространенным практическим приложением и модельным теоретическим примером, исследуемым вплоть до самого последнего времени, является течение в трубах [1–3]. Особую сложность представляет расчет турбулентных течений. Имеется целый ряд расчетных методов, пригодных для тех или иных условий. Большое распространение получили полуэмпирические модели феноменологического типа, в которых осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса дополняются тем или иным приближенным выражением, уравнением или системой уравнений. Эти методы не дают возможности явным образом вводить в рассмотрение основной физический аспект турбулентного течения, а именно сами вихри или вихревые трубки, заменяя это явление некоторыми внутренними параметрами (турбулентной вязкостью, кинетической энергией, скоростью диссипации кинетической энергии и т.п.).

Другая группа расчетных методов – метод прямого численного моделирования (*DNS*-метод) и метод моделирования крупных вихрей (*LES*-метод) – применяет уравнения Навье-Стокса без их осреднения и, в основном, не использует вышеназванные параметры. *DNS*-метод сводится к прямому решению трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, требующему столь малых пространственных и временных шагов сетки, что это пока еще затруднительно даже при современных возможностях вычислительной техники, особенно при больших числах Рейнольдса. *LES*-метод облегчает требования к вычислительной мощности, применяя прямые вычисления только к областям с крупными вихрями и учитывая участки с мелкими вихрями так же, как это делается в первой группе методов.

Данная работа примыкает ко второй группе методов. В рассмотрение вводится задаваемая априори система вихрей, которая рассчитывается напрямую. Как и во второй группе методов, используются уравнения Навье-Стокса без осреднения. В то же время основу формирования системы вихрей составляют данные о профиле турбулентной вязкости – понятия, связанного с методами первой группы. При этом главным упрощающим обстоятельством является замена вихрей эквивалентными им (по динамическому воздействию) флуктуациями плотности. В качестве примера рассматривается турбулентное течение в трубах. Работа является продолжением ряда других, опубликованных ранее работ. Так, в работах [4, 5] рассматривалось влияние переменной (по радиусу канала) вязкости, вызванной течением разнородных сред, на поле скоростей ламинарного и турбулентного потоков. Рассматривались слоистые течения; было определено понятие постоянной «эффективной» вязкости, которая эквивалентна переменной – в определенном расчетном смысле. В работе [6] была предложена физическая концепция турбулентного течения как течения сквозь «вихревую засыпку» из образующихся, движущихся и распадающихся вихрей, а также получено новое уравнение турбулентного движения в трубах. Это уравнение не содержит экспериментальных параметров и включает дополнительный член, отвечающий за внутреннее сопротивление «вихревой засыпки». В работе [7] был предложен метод локальных флуктуаций – метод моделирования неоднородных сред (в частности,

систем с засыпками), позволяющий вводить в компьютерное или аналитическое рассмотрение полей одиночные включения или системы включений – как различные типы неоднородности среды. Если рассматривать эти работы как анализ различных случаев переменной вязкости, то в данной работе, в дополнение к работам [6; 7], рассмотрено влияние вязкости в более сложном случае – когда при постоянной физической вязкости эффективная (реально действующая) вязкость является переменной. Такая физическая картина имеет место при турбулентности. Этот подход позволяет производить численные эксперименты над турбулентным потоком с произвольной, задаваемой априори вихревой структурой, то есть, по существу, изменять эффективную вязкость и рассматривать «под микроскопом» физическую суть процесса. Это важно, поскольку «многообразие проблем турбулентности не должно затемнять тот факт, что сердцевиной предмета является физика» [8]. Это создает, как и *DNS*-метод, дополнительный источник экспериментальных данных, что важно в связи с ограниченностью возможностей измерительной техники.

Теоретические основы и методика моделирования

Основой предлагаемого метода является замена системы вихрей или вихревых трубок, присутствующих в турбулентном потоке, системой локальных флуктуаций вязкости, дающей те же или близкие к ним интегральные характеристики потока. Иными словами, это сравнение турбулентной «вихревой засыпки» с некоторой гипотетической засыпкой, состоящей из жидких объектов другой вязкости и, в общем случае, других размеров, но дающей тот же профиль скоростей. Нахождение структуры эквивалентной засыпки в зависимости от числа Рейнольдса и условий течения является трудной многокритериальной задачей. В рамках данной работы будет показано, что она принципиально и технически выполнима.

Введем следующее определение. Назовем эквивалентной засыпкой, дающую в турбулентном потоке в трубе тот же профиль скорости и то же сопротивление, что и «натуральная» вихревая засыпка, т.е. сам поток. Критерием эквивалентности будем считать равенство суммы сил давления, действующих на контрольную поверхность объекта или флуктуации при данном значении *Re*. Этот признак гарантирует одинаковость динамического воздействия объекта и его модели на окружающую среду (жидкость). Разумеется, эквивалентность одиночных объектов не гарантирует эквивалентности ансамбля, но является первым шагом к такой эквивалентности. Ниже поэтапно будет изложена данная методика.

1. Моделирование одиночного вихря. Замена вихря локальной флуктуацией вязкости

Рассмотрим некоторые данные, которые определяют возможность замены (в целях расчета) вращающихся подвижных вихрей или вихревых трубок также подвижными, но не вращающимися объемами другой вязкости. Эквивалентность такой замены будет достигнута в соответствии с известным методом Шварца, если вместо вырезанной части расчетной области будет вставлена другая часть, обладающая тем же динамическим воздействием на окружающую среду. В качестве такого динамического воздействия можно выбрать интеграл I_p от сил давления по поверхности того объема, который выбрасывается. В случае нестационарной задачи к этому условию добавляется еще и условие равенства масс (плотностей).

Процесс выбора параметров требуемой эквивалентной замены рассмотрим на конкретном примере единичного вращающегося шарового объема жидкости, находящегося на оси трубы и движущегося вместе с жидкостью. В данном примере диаметр трубы $D=0,2$ м, высота $H=0,3$ м, диаметр шара $d=0,1$ м, средняя скорость потока $w_0=100$ м/с, плотность жидкости (газа) $\rho=1$ кг/м³, динамическая вязкость $\mu=10^{-3}$, профиль входной скорости параболический, число Рейнольдса по диаметру шара $Re_{ш}=10^4$. Задача решается как *swirl*-модель системы *Comsol Multiphysics*, в которой граничные условия на поверхности Γ шарового вихря, вращающегося вокруг оси канала, задаются так: $u_\Gamma=u$, $v_\Gamma=v$, $w_\Gamma=\omega \cdot r$. Сила давления на вихрь в зависимости от скорости вращения вихря $I_p=f(\omega)$ показана на рис. 1.

Из этого рисунка следует, что изменение угловой скорости вращения вихря от очень малой ($\omega=0,001$ 1/сек) до очень большой ($\omega=100$ 1/сек) мало сказывается на величине силы давления, изменяя ее не более, чем на 10–12% от среднего значения. Уже малая скорость вращения делает вращающийся объем почти непроницаемым для внешнего потока, и степень этой непроницаемости с увеличением скорости вращения меняется мало. Вращение вихря в других направлениях тоже мало меняет динамическое воздействие на него. Эти обстоятельства благоприятствуют условиям моделирования, делая их мало зависящими от разброса скоростей вращения вихрей. Для дальнейшего описания методики работы (при данном числе Рейнольдса) за основу примем среднее значение $I_p^*=-0,325$ Н.

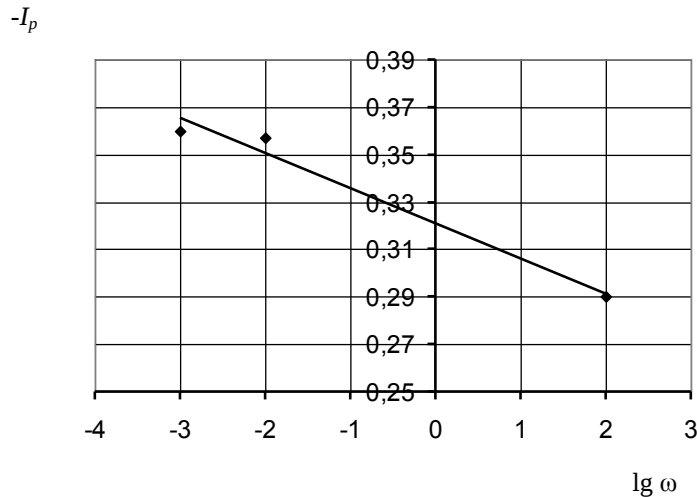


Рис. 1. Зависимость величины интегрального давления I_p , Н, действующего на поверхность единичной шаровой флуктуации, от угловой скорости вращения ω

Далее возникает вопрос о том, как найти величину вязкости рассматриваемой флуктуации, которая придаст ей необходимую интегральную силу давления в данных условиях. Для определения зависимости $I_p=\varphi(\mu)$ проводится серия расчетов, результаты которых показаны на рис. 2, а затем графически определяется искомая величина вязкости. В нашем случае она равна $\mu^*=0,4$ Па·сек. Таким образом, получена эквивалентная вязкость флуктуации данного радиуса при данном значении Re (подсчитанному по диаметру шара). Следует отметить, что при малой вязкости флуктуации существует разница в скоростях между ее носовой и кормовой частями, что должно приводить к ее деформации. При большой вязкости такой разницы нет, и флуктуация движется как твердое тело со скоростью, равной средней скорости жидкости в том же месте и при том же объеме.

2. Моделирование системы вихрей

Рассмотрев получение одиночной эквивалентной флуктуации, обратимся теперь к вопросу формирования системы вихрей применительно к круглой цилиндрической трубе. Построим систему вихревых трубок тороидальной формы, окружающих ось трубы и расположенных в шахматном порядке. Эти трубки будут иметь вязкость, существенно отличающуюся от вязкости несущей среды.

Для построения такой структуры используем метод локальных флуктуаций [5], который является методом компьютерного моделирования и позволяет при моделировании любых физических процессов вводить в рассмотрение неоднородности физических сред простым и единообразным образом. Эти неоднородности описываются с помощью математических выражений, содержащих как обычные, так и логические функции. Отдельного задания неоднородностей как геометрических объектов не требуется.

Описанные таким образом включения автоматически распространяются на всю область при любой её форме. С помощью данного метода могут рассчитываться как жидкие и газообразные (двух- и многофазные) среды, так и неоднородные твердые тела (композитные, пористые и пр.). Метод позволяет учитывать изменения неоднородностей (их формы и размеров) в ходе физического процесса, т.е. ставить и решать широкий круг задач.

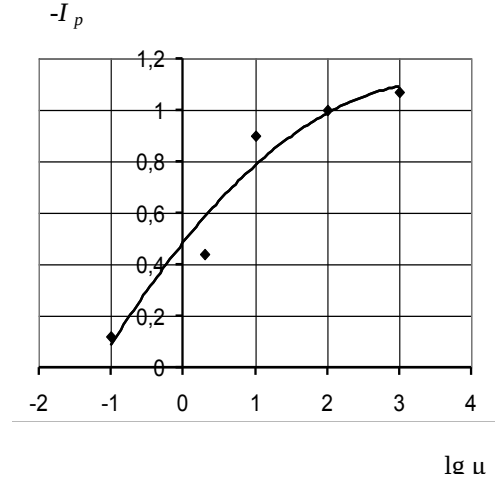


Рис.2. Зависимость величины интегрального давления I_p , Н, действующего на поверхность единичной шаровой флуктуации, от ее вязкости μ , Па·с

Чтобы задать в плоской области (r, z) (плоском сечении трубы, проходящем через ось), систему круговых включений с радиусом R , расположенных в прямоугольном порядке, зададим характеристическую функцию этих включений в виде

$$f(r, z) = ((r - r_0)^2 + (z - z_0)^2) \leq R(r, z)^2. \quad (1)$$

Эта логическая функция равна единице внутри кругов и нулю вне их. Здесь $r_0 = ([r/a] + \{r/a\}) / (2/a)$, $z_0 = ([z/b] + \{z/b\}) / (2/b)$ – набор координат центров кругов, с расстоянием a между их центрами по оси r и b – по оси z . Прямые и фигурные скобки в этом выражении обозначают, соответственно, функции «ближайшее целое слева» и «ближайшее целое справа».

Более близким к естественному (хаотическому) расположению вихрей на плоскости является шахматное распределение вихрей, которое создает большую загруженность области, чем прямоугольное их расположение. Для создания последующих рядов включений используем ту же функцию (1), но сдвинутую относительно первой на величину m по оси r и n по оси z , а именно функцию $\varphi(r, z) = f(r - m, z - n)$. Сумма функций $f(r, z)$ и $\varphi(r, z)$ создаст шахматное расположение круговых включений. Вязкость всей структуры определим выражением

$$\mu = \mu_0 + (\mu_2 - \mu_0)(f(r, z) + \varphi(r, z)). \quad (2)$$

В соответствии с выражением (2) во всех точках вне круговых включений, где $f(r, z) = \varphi(r, z) = 0$, получаем $\mu = \mu_0$, т.е. вязкость равна вязкости текущей жидкости. Внутри круговых включений имеют место условия $f(r, z) = 1$ или $\varphi(r, z) = 1$ (поскольку эти круговые включения не пересекаются), и вязкость оказывается равной заданной вязкости внутренней части круговых включений, т.е. $\mu = \mu_2$. Необходимо отметить, что сформированные таким образом флуктуации вязкости представляют собой как бы сгустки вещества и двигаются вместе с потоком, но с несколько иной скоростью, получаемой в результате решения задачи.

Конкретная реализация структуры модели вихревой засыпки в плоском сечении через ось канала производится следующим образом. Задав некоторую величину R_0 и положив $a = 2R_0$, $b = a\sqrt{3}$, $m = a/2$, $n = (a\sqrt{3})/2$, получим плотную треугольную упаковку кругов радиуса R_0 . Уменьшая радиус кругов $R=R(r)$ при сохранении величин a , b , m , n получаем возможность изменять загруженность засыпки, т.е. отношение суммарной площади кругов ко всей расчетной площади (при сохранении ее общей структуры). Применение данной методики будет продемонстрировано далее.

3. Профиль турбулентной вязкости и его формирование. Система вихрей переменных размеров и положения

Для ответа на вопрос о том, можно ли разработать и воспроизвести такую систему неоднородностей-включений, имитирующих вихри или вихревые трубки, чтобы она приводила к турбулентным профилям средних скоростей потока в трубах, надо знать:

- а) величину и профиль эффективной («турбулентной») вязкости в трубах и
- б) степень влияния вязкости включений на эффективную вязкость «смеси».

Турбулентная вязкость потока в трубах сама по себе изучена очень хорошо. Однако не выявлена связь турбулентной вязкости с внутренним сопротивлением, создаваемым турбулентной «вихревой засыпкой». Для выявления этой связи рассмотрим внутреннее сопротивление турбулентного потока на основе уравнения движения, предложенного в работе [4]. Это уравнение в относительных переменных ($x=r/R$, $y = w / w_a$) имеет вид

$$\frac{1}{x}(xy')' = G(1 - \theta \frac{y^2}{y(0)^2(1-x^2/2)}). \quad (3)$$

Здесь y – относительная скорость; x – относительный радиус; w – скорость, м/с; w_a – средняя скорость потока, м/с; r – радиус, м; R – радиус канала, м; $G = PR^2/\mu w_a$, где $P = \partial p / \partial z$ – градиент давления, Па/м, p – давление, Па, z – направление по оси потока, м, μ – динамическая вязкость, Па·с; θ – характеристическая функция зоны течения.

Уравнение (3) дополнено граничными условиями: $y'=0$ при $x=0$ (на оси); $y = y_k$ при $x = x_k$ (в конце турбулентного ядра), и условием баланса расхода. В пределах турбулентного ядра $0 \leq x \leq x_k$ коэффициент $\theta = 1$.

Внутреннее сопротивление в уравнении (3) представлено вторым членом в скобке правой части. Это выражение является отношением $\gamma = F/P$ градиента сил сопротивления F к градиенту сил давления P [4]. Численное решение уравнения (3) позволяет найти зависимость величины γ от радиуса канала при различных значениях числа Re , что показано на рис. 3. Величина γ близка к единице на большей части турбулентного ядра и резко уменьшается только при $x \geq 0,5 \div 0,7$. Внутреннее сопротивление F (поскольку P не меняется по радиусу) ещё более уменьшается в переходной области, где $\theta \approx 0,5$, и полностью исчезает в ламинарном подслое, где $\theta = 0$. Стоит отметить, что поведение величины γ достаточно хорошо соответствует распределениям турбулентной вязкости, приведенным в работах [6–8].

Итак, определен профиль турбулентного сопротивления F , но не его величина. Для определения этой величины рассмотрим вопрос о соотношении физической и расчетной турбулентной вязкостей, как по величине, так и по форме. Для этого сравним между собой два уравнения Навье-Стокса для стационарного течения в круглой трубе. Первое уравнение зададим с переменной вязкостью $\mu_t(r)$ и градиентом P_1 , соответствующим турбулентному режиму, т.е. в виде $(\mu_t(r)rw'_t)' / r = P_1$. Второе уравнение зададим с постоянной вязкостью μ_0 и градиентом P_2 , соответствующим ламинарному режиму, т.е. в виде $(\mu_0rw')' / r = P_2$. Однократно проинтегрируем (с учетом условия на оси) эти уравнения и разделим их почленно друг на друга. Получим (при переходе к относительным величинам) соотношение $\frac{\mu_t(x)}{\mu_0} = \frac{y' \xi}{y'_t \xi}$. Используя для нахождения производных y' и y'_t логарифмический профиль

$y_t = \sqrt{\frac{\xi_t}{8}} \left(\frac{1}{k} \ln \eta + B \right)$ в турбулентном случае и параболический $y = 2(1-x^2)$ в ламинарном случае, а для коэффициентов сопротивления формулы $\xi_t = (1.81 \lg Re - 1.5)^{-2}$ (П.К. Конаков) и $\xi = 64/Re$, получаем следующую зависимость турбулентной вязкости от физической вязкости, режима течения и радиуса канала:

$$\mu_t(x) = A \mu_0 \varphi(x), \quad (4)$$

где $A = \frac{k Re}{8\sqrt{8}(1.81 \lg Re - 1.5)}$ и введено обозначение $\varphi(x) = 4x(1-x)$.

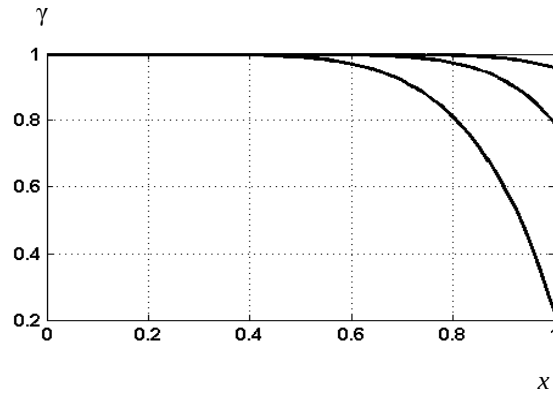


Рис. 3. Распределение величины $\gamma = F/P$ по радиусу канала $x = r/r_0$ для $Re = 4 \cdot 10^3$; $4 \cdot 10^5$; $4 \cdot 10^4$ (сверху вниз)

В соответствии с предложениями в работах [9, 10], а также на основании рис. 3 примем, что от оси и до некоторого значения $x \geq 0,5$ отношение $\mu_t(x)/\mu_0$ – постоянная величина. Это приводит к следующему видоизменению функции $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = (x \leq 0,5) + 4x(1-x)(x > 0,5). \quad (5)$$

Результаты расчетов по формулам (4), (5) хорошо согласуются с известными экспериментальными данными, определяющими турбулентную вязкость. Таким образом, с помощью сравнения общеизвестных соотношений для профиля скорости и коэффициента сопротивления турбулентного и ламинарного потоков получено новое простое выражение для величины и изменения по радиусу средней вязкости турбулентного потока, т.е. получен ответ на вопрос а) данного раздела.

Рассмотрим теперь вопрос б) этого раздела – о влиянии вязкости включений на среднюю вязкость «смеси», т.е. на турбулентную вязкость потока. Физическая вязкость вихрей, вихревых и дипольно-вихревых трубок является, разумеется, такой же, как и у окружающей их жидкости. Однако при своем вращении они почти перестают пропускать через свой объем окружающую среду, т.е. становятся как бы многократно более вязкими. Это существенно влияет на среднюю вязкость потока, а именно, увеличивает ее. В то же время за счет уменьшения размера вихрей-зерен при приближении к стенкам, т.е. разрежения турбулентной «засыпки» (уменьшения загруженности сечения) происходит уменьшение средней вязкости по радиусу канала. Для оценки влияния размера включений на вязкость потока была проделана серия расчетов с меняющимися от расчета к расчету размерами зерен. При этом размеры зерен по радиусу канала были постоянными. Конкретные данные расчетной схемы приведены в следующем разделе. Рассмотрение начиналось с предельного случая – плотной упаковки зерен некоторого радиуса R_0 , имеющих собственную вязкость μ_2 (при вязкости жидкости μ_1). Конкретная величина R_0 не имеет значения, поскольку при плотной упаковке загруженность сечения не зависит от радиуса. Последовательно уменьшая радиус зерен R , получили, что отношение средней

вязкости однородной смеси к вязкости зерен уменьшается, как $(R/R_0)^3$. Поэтому, чтобы средняя вязкость менялась как $\varphi(x)$, нужно, чтобы радиус включений менялся как

$$R(x) = R_0 \varphi(x)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где R – принятый радиус включений вблизи оси потока.

Вторая серия расчетов была проведена с использованием зависимости (6). При этом числа Рейнольдса, подсчитанные по диаметру канала, менялись в турбулентном диапазоне от 10^4 до 10^7 . В результате была получена следующая рекомендация для вязкости зерен-флуктуаций μ_2 :

$$\mu_2 \approx 0,02(\lg Re)^{5,2} \text{ Ац}_0. \quad (7)$$

Стоит отметить, что при увеличении числа Re в 10 раз расчетная вязкость зерен засыпки увеличивается в 20 раз.

Результаты

Рассмотрим профили скоростей течения со сформированной таким образом «засыпкой» при различных средних скоростях течения. Были проведены расчеты течения воды при $Re=10^4$; 10^5 ; 10^6 ; 10^7 в вертикальной круглой трубе диаметром 0,08 м и высотой 0,2 м. Формулы (4)–(7) совместно со значениями необходимых величин позволили рассчитать поле вязкости потока с учетом переменности радиусов включений (зерен). Поле вязкости, полученное в результате этого расчета, показано на рис. 4. Наглядно видно, как уменьшаются размеры зерен и загруженность течения при приближении к стенкам.

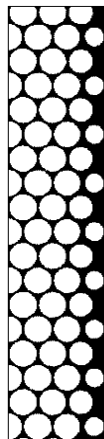


Рис. 4. Расчетное поле вязкости в осевом сечении трубы (правая половина). Белый цвет – сечения вихревых трубок («зёрна»), черный – несущая жидкость (вода)

На входе в трубу задавался ламинарный профиль скорости со средним значением, обеспечивающим необходимое число Re . Расчет проводился в системе *Comsol Multiphysics* по стандартной программе расчета ламинарного течения. Расстояние между центрами зерен шахматной «засыпки» составляло величину $a=0,012$ м. Размер зерен изменялся по радиусу канала в соответствии с выражением (6) при $R=5,6 \cdot 10^{-3}$ м. Вязкость «зерен» при $Re=10^4$; 10^5 ; 10^6 ; 10^7 была задана как 0,8; 20; 350; 8000 Па·с соответственно.

На рис. 5 показана средняя скорость турбулентного течения в поперечном сечении на расстоянии 0,18 м от входного сечения при вышеназванных значениях Re . Имеет место хорошее совпадение с экспериментальными данными [3]. Стоит отметить, что перестройка профиля скорости из ламинарного режима, заданного на входе, в турбулентный происходит на расстоянии полутора–двух диаметров канала. Это следует учитывать при задании размеров расчетной области. Некоторая негладкость кривых, их квазипериодические

возмущения связаны с существенной неоднородностью расчетного поля, с наличием флуктуаций вязкости.

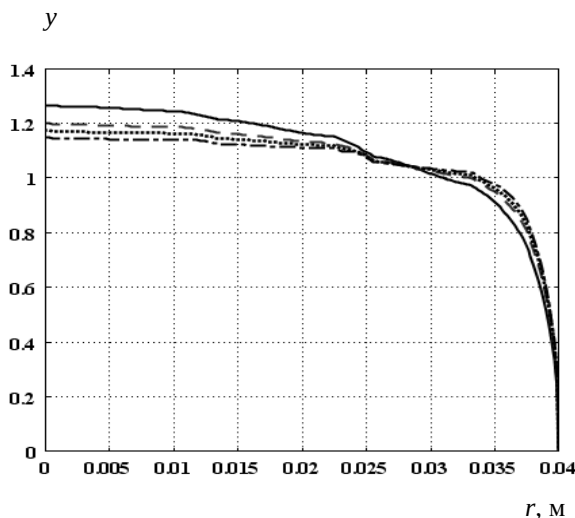


Рис. 5. Относительная скорость $y=w/w_a$ турбулентного течения в поперечном сечении трубы при наличии «вихревой засыпки» в зависимости от радиуса r , м.

Кривые соответствуют $Re=10^4$; 10^5 ; 10^6 ; 10^7 – сверху вниз (в левой части рисунка)

Таким образом, сформированная вышеописанным образом система тороидальных флуктуаций вязкости в круглой трубе, имитирующая реальную систему вихрей, дает то же среднее поле скоростей, что и в натурном эксперименте, во всем диапазоне турбулентных чисел Рейнольдса.

Обсуждение

Можно предположить, что круг задач, которые можно рассмотреть предлагаемым методом, ограничен. Однако это не так. Для расширения круга задач можно ввести в рассмотрение целый ряд дополнительных параметров. Параметры структуры засыпки и параметры ее характеристических функций легко сделать зависящими от времени, координат или скоростей. С помощью этих параметров засыпку можно сделать распадающейся и возникающей, колеблющейся, эллипсовидной и т.п. Могут рассчитываться двух- и многофазные потоки.

Предлагаемый подход не является трудоемким. Разница, по сравнению с другими методиками расчетов, состоит только в задании вязкости расчетного поля. При этом кроме констант в список выражений расчетной программы вписываются формулы (4)–(7). Расчетную область, например канал нужного размера, задать очень просто. Вязкость всех точек расчетного поля рассчитывается практически мгновенно, время расчета поля скоростей для каждого конкретного Re также невелико и зависит от степени подробности сетки. Расчет турбулентного течения ведется по программе для ламинарного течения (что сильно ускоряет работу), при этом действия по поддержанию устойчивости счета сведены к минимуму.

Связь параметров моделирования с потерями давления должна стать предметом дальнейшего анализа, но частный случай такого рассмотрения уже был приведен в работе [7] при моделировании ламинарного течения пароводяной смеси. Кроме того, в дальнейшем возможен подход, еще более близкий к естественным условиям, а именно – переход от вязких флуктуаций к вращающимся, так называемым «замороженным роторам». Дальнейшее накопление данных о размерах и взаиморасположении вихрей около стенок и других препятствий позволит в будущем отказаться от опоры на профиль турбулентной вязкости.

Заключение

В данной работе с помощью математического моделирования и прямой компьютерной реализации расчета потока с включениями, имитирующими «вихревую засыпку», показано, что величина и профиль турбулентной вязкости потока в трубах полностью определяются структурой и свойствами этой засыпки. Показано, что расчет течения с учетом определенной системы неоднородностей текущей среды приводит к турбулентному профилю осредненной скорости. При этом использовано обычное уравнение Навье-Стокса без каких-либо дополнительных величин. Построение модели проведено методом локальных флуктуаций.

Результаты работы подтверждают концепцию о возможности рассмотрения турбулентности как ламинарного течения через «вихревую засыпку», создаваемую текущей средой. Ранее эта концепция, предложенная в работе [6], была косвенно подтверждена полученным на ее основе уравнением турбулентного течения в трубах. Теперь она получила прямое подтверждение с помощью численного эксперимента. С помощью данного метода можно проводить численные эксперименты также и в других условиях и при другой геометрии, сопоставляя результаты вариантных расчетов с результатами физического эксперимента и выявляя, таким образом, внутреннюю суть процесса.

Литература

1. Баренблатт Г.И., Корин А.Дж., Простокишин В.М. Турбулентные течения при очень больших числах Рейнольдса: уроки новых исследований // УФН. 2014. Т. 184, №3. С. 265–272.
2. Вигдорович И.И. Описывает ли степенная формула турбулентный профиль скорости в трубе? // УФН. 2015. Т. 185, № 2. С. 213–216.
3. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. J. Fluid Mech. 1998. V. 373. P. 33–79.
4. Меламед Л.Э., Тропкина А.И., Фальковский Л.Н. Влияние переменной вязкости на ламинарные и турбулентные слоистые течения многофазных сред // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №1–2. С. 26–35.
5. Меламед Л.Э., Филиппов Г.А., Тропкина А.И. Эффективная вязкость и основные свойства многофазных слоистых течений // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5–6. С. 13–22.
6. Меламед Л.Э. Уравнение турбулентного движения в трубах // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, Вып. 24. С. 23–28.
7. Меламед Л.Э. Метод локальных флуктуаций и моделирование неоднородных сред // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, Вып. 19. С. 31–37.
8. Baumert H.Z. Universal equations and constants of turbulent moution. ArXiv: 1203.5042v2 [physics.flu-dyn] 30 May 2012.
9. Корневский А.А., Рябинин М.В. Определение профиля скорости в круглой цилиндрической трубе при турбулентном режиме течения с использованием численных методов // Экспозиция нефть газ. 2016. № 3 (49). С. 64–70.
10. Лапин Ю.В., Гарбарук А.В., Стрелец М.Х. Алгебраические модели турбулентности для пристенных канонических течений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2004. № 2. С. 1–32.

Авторы публикации

Меламед Лев Эммануилович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник закрытого акционерного общества «Центр физико-технических проектов «Атомэнергомаш», г. Москва. E-mail: lev.melamed@yandex.ru.

Филиппов Геннадий Алексеевич – д-р техн. наук, академик РАН по Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (ОММПУ) РАН, г. Москва.

References

1. Barenblatt G.I., Korin A.Dzh., Prostokishin V.M. Turbulentnye techeniya pri ochen' bol'shikh chislakh Reynol'dsa: uroki novykh issledovaniy // UFN. 2014. V. 184, No. 3. P. 265–272.
2. Vigdorovich I.I. Opisivaet li stepennaya formula turbulentnyi profil' skorosti v trube? // UFN. 2015. V. 185, No. 2. P. 213–216.
3. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. J. Fluid Mech. 1998. V. 373. P. 33–79.
4. Melamed L.E., Tropkina A.I., Fal'kovskii L.N. Vliyanie peremennoi vyazkosti na laminamye i turbulentnye sloistye techeniya mnogofaznykh sred // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2013. No. 1–2. P. 26–35.
5. Melamed L.E., Filippov G.A., Tropkina A.I. Effektivnaya vyazkost' i osnovnye svoystva mnogofaznykh sloistnykh techenii // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2014. No. 5–6. P. 13–22.
6. Melamed L.E. Uravnenie turbulentnogo dvizheniya v trubakh // Pis'ma v ZhTF. 2015. T. 41, Vyp. 24. P. 23–28.
7. Melamed L.E. Metod lokal'nykh fluktuatsii i modelirovanie neodnorodnykh sred // Pis'ma v ZhTF. 2016. T. 42, Vyp. 19. P. 31–37.
8. Baumert H.Z. Universal equations and constants of turbulent moution. ArXiv: 1203.5042v2 [physics.flu-dyn] 30 May 2012.
9. Korenevskii A.A., Ryabinin M.V. Opreделение profilya skorosti v krugloi tsilindricheskoi trube pri turbulentnom rezhime techeniya s ispol'zovaniem chislennykh metodov // Ekspozitsiya nef't gaz. 2016. No. 3 (49). P. 64–70.
10. Lapin Yu.V., Garbaruk A.V., Strelets M.Kh. Algebraicheskie modeli turbulentnosti dlya pristennykh kanonicheskikh techenii // Nauchno-tekhicheskie vedomosti SPbGPU. 2004. No. 2. P. 1–32.

Authors of the publication

Melamed Lev Emmanuilovich – Dr. Sci. (Techn.), chief scientist of closed joint-stock company “Center of physicotchnical projects Atomenergomash”, Moscow. E-mail: lev.melamed@yandex.ru.

Filippov Gennady Alekseevich – Dr. Sci. (Techn.), professor, member of Russian Academy of Sciences, Department of power, mechanical engineering, mechanics and control processes, Moscow.

Поступила в редакцию

25 июня 2017 г.



УДК 621.3.047,4:629.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОЩЁТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

О.А. Филина

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

olga_yuminova83@mail.ru

Резюме: В статье изложен один из возможных путей решения поставленной задачи, посредством применения составных электрощёток с повышенным ресурсом на ТЭД для городского электротранспорта и локомотивов, за счёт использования повторно неизнашиваемой части щеток.

Ключевые слова: эксплуатационный режим, электрощетка, электродвигатель, износостойчивость, коллектор.

A STUDY OF THE WORKING LIFE OF THE BRUSHES OF A DC MOTOR OF ROLLING STOCK

O.A. Filina

Kazan state power engineering University, Kazan, Russia

olga_yuminova83@mail.ru

Abstract: This article outlines one of the possible ways to solve the problem by applying composite brushes with heightened resource on TED for municipal electric and locomotives by using re-neizlechimoj part of the brushes.

Keywords: maintenance mode, electro brush, motor, durability, collector

Введение

Рассматривается задача повышения ресурса путём использования новой конструкции электрощёток. Данное конструктивное решение хорошо согласуется с конкретными типами тяговых электродвигателей (ТЭД), применяемых на городском и железнодорожном транспорте, и удовлетворяет техническим условиям (ТУ) на их эксплуатацию. Применение разработанной конструкции электрощёток ведёт к повышению ресурсных показателей скользящего контакта ТЭД, снижению коэффициента ремонтпригодности.

Проблема увеличения ресурса работы коллекторно-щеточного узла (КЩУ) наиболее остро стоит применительно к ТЭД, уровень загрузки которого в ряде случаев составляет круглосуточная работа. Например, если ресурс работы электрощеток в электродвигателях для городского электротранспорта и локомотивов, как правило, составляет пробег между ТР2, то требуется неоднократная замена щеток в процессе эксплуатации. С целью повышения ресурса КЩУ разрабатываются все более совершенные марки электрощёток с повышенной надежностью, износостойчивостью и коммутлирующей способностью [1; 2].

Постановка задачи

Обзор литературы по данному вопросу показал, что технический ресурс электрощёток связан с износом элементов КЩУ. Механический и электроэрозионный износ обусловлен влиянием состояния коллектора и коммутационного искрения в скользящем контакте, которые, в свою очередь, зависят от многих факторов. Следовательно, для улучшения показателей работы КЩУ электродвигателей необходимо применение таких конструктивных решений, которые позволяют снизить влияние указанных факторов. В работах [3–5] таким техническим решением является введение разреза в тело электрощётки.

Рекомендуемая составная разрезная щётка [4, 5] выполнена в соответствии требованием ГОСТ 12232-89. Она выполнена составной (введён поперечный разрез, замковая часть), в то время как существующие конструкции электрощёток или неразрезные, или продольно разрезные. Конструкция КЩУ электрической машины остаётся неизменной.

В процессе эксплуатации происходит постоянный непрерывный износ электрощёток. Изношенные щётки не восстанавливаются, подлежат замене и утилизации совместно с дорогостоящими элементами конструкции.

На рис. 1. показана серийная электрощётка с указанием основных элементов.

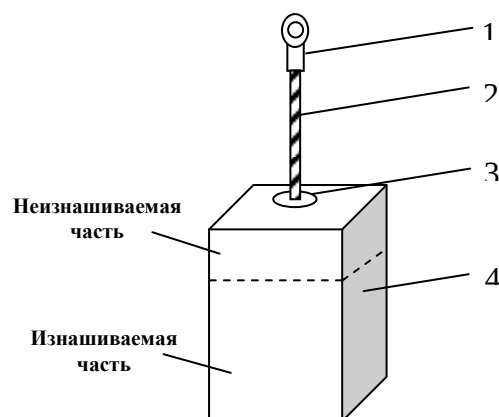


Рис. 1. Конструкция серийной (неразрезной) электрощётки:

1 – наконечник луженый; 2 – медный провод гибкий неизолированный плетёный;
3 – материалы для соединения токоведущего провода с телом щетки (конопатка, электропроводящий клей, медный порошок); 4 – угольно-графитовая часть

Предлагаемая конструкция позволяет использовать верхнюю (неизнашиваемую) часть электрощётки неоднократно, что, в свою очередь, позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты электрических машин и исключить утилизацию неизношенных частей. Это связано с тем, что при замене изношенной сменной вставки не требуется полной замены щетки. Достаточно только установить новую сменную вставку. Весь процесс замены сменной вставки значительно облегчает работу обслуживающего персонала и сокращает время профилактических работ до 70%.

Составная электрощётка (рис. 2) с повышенным ресурсом функционально не отличается от серийной ни по типоразмеру, ни по технологии изготовления и эксплуатации. Основное отличие заключается в конструкции тела щетки. В гильзе щёткодержателя 1 располагается неизнашиваемая часть 2 составной электрощётки и сменная графитовая вставка 3, скользящая по коллектору 4 электрической машины. Прижим электрощётки к коллектору осуществляется пружиной 5. Данное усилие создает надежный контакт в плоскости соприкосновения 6 между основной частью составной электрощётки и сменной графитовой вставкой.

Предложенная конструкция, как показывают расчеты, также обеспечивает уменьшение коэффициента ремонтпригодности.

Ориентировочно стоимость неизношенных остатков составляет на 3 июля 2017 г. около 60% от общей стоимости электрощетки (70000 руб.): для электрощёток ЭГ61А 1000шт. – соответственно 42000 руб.

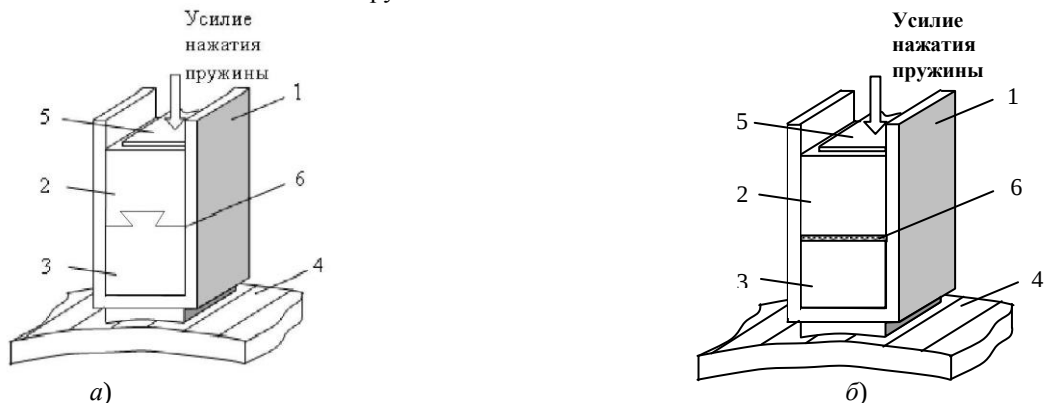


Рис. 2. Схематическое изображение КЩУ: а – составная электрощетка с замковой частью; б – составная (разрезная)

Составные разрезные щётки обеспечивают надёжный электрический контакт с вращающимися частями электрических машин и не вызывают нарушения этого контакта, как показали лабораторные измерения, проведенные на кафедре «Электротехнические комплексы и системы» КГЭУ под руководством П.П. Павлова, в статическом режиме сопротивление увеличивается на 9–13% [3].

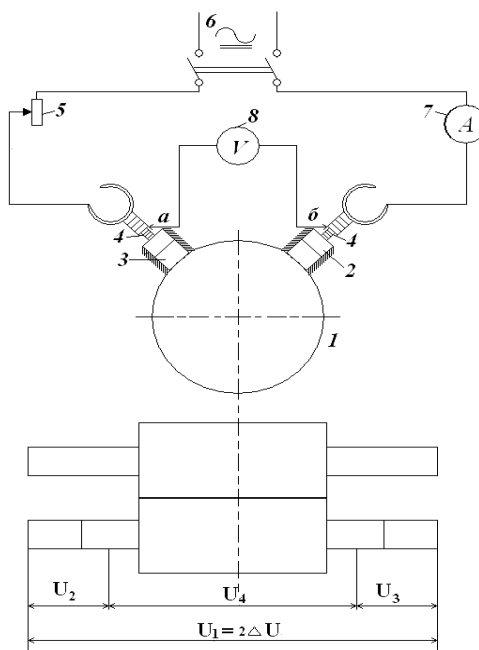


Рис. 3. Принципиальная схема короткозамкнутого коллектора и замера падения напряжения на щётках: 1 – короткозамкнутый коллектор; 2 – составные электрощётки - неизнашиваемая часть; 3 – составные электрощётки - изнашиваемая часть; 4 – токоведущие провода; 5 – реостат; 6 – источник постоянного тока 6–12 В

Испытания включали в себя проверку коллекторных характеристик: измерение величины общего падения напряжения на паре щеток ($2\Delta U$), износ и коэффициент трения.

Данная схема измерения позволила, кроме замеров падения напряжения $2\Delta U$, измерять падение напряжения в разрезе тела электрощёток.

Результаты испытаний (неразрезной) серийной и составной разрезной электрощёток были занесены в протокол, и на его основании построены зависимости падения напряжения на пару щёток $2\Delta U$ (усреднённые) от времени испытания (рис.4).

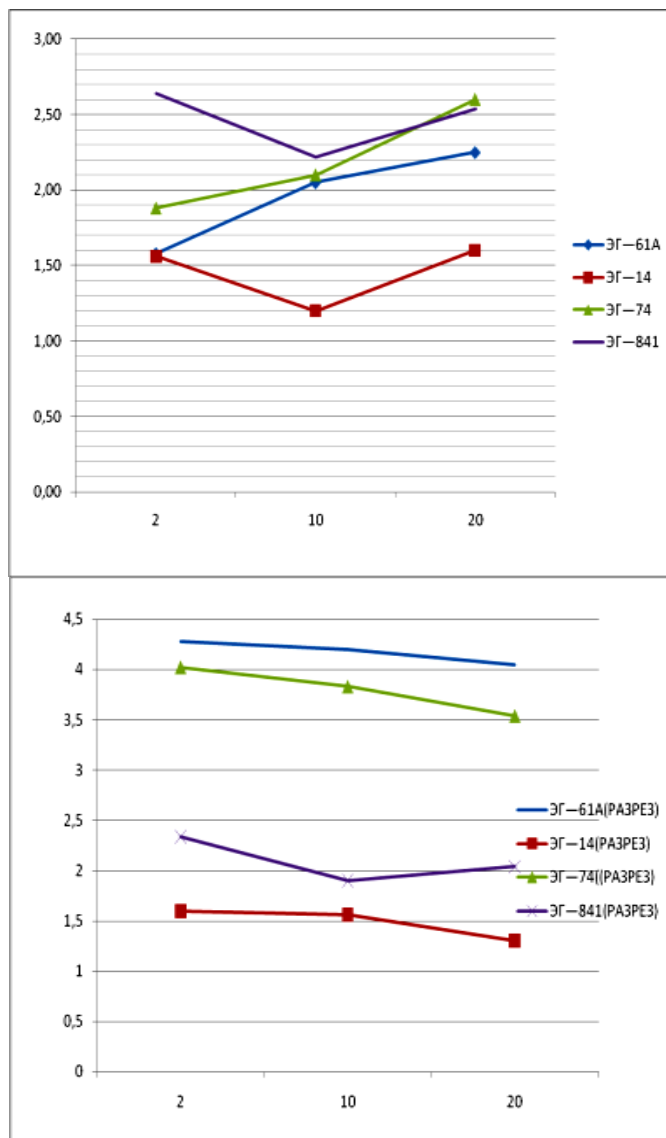


Рис. 4. Зависимости падения напряжения на пару щёток $2\Delta U$ (усреднённые) от времени испытания: а – серийная (неразрезная); б – составная разрезная

Как видно из рис 4, в начале и конце измерений для неразрезных щеток характерно увеличение падения напряжения, что можно объяснить ростом температуры КЩУ. Для составных разрезных щёток характерно уменьшение падения напряжения на 0,2–0,3 В

после завершения испытаний, что можно объяснить приработкой контактных поверхностей в разрезе тела щётки.

Проведенные экспериментальные исследования на других образцах щёток, выполненные с использованием данной методики, показали, что, несмотря на относительное увеличение падения напряжения на паре щёток $2\Delta U$, их можно использовать в условиях эксплуатации независимо от типа электрической машины и условий ее эксплуатации.

При испытаниях также выявлено, что остальные параметры коллекторных характеристик составных электрощёток с повышенным ресурсом находятся в пределах норм, определяемых ТУ.

Следующий этап проведения эксперимента заключался в обработке полученных статистических данных. С этой целью использовалась программа *Staitica* 6.0. На основании результатов были построены гистограммы распределения переходного падения напряжения на пару щёток $2\Delta U$ (рис. 5, 6) всех серийных электрощёток выпуска 2005г. и составных разрезных электрощёток.

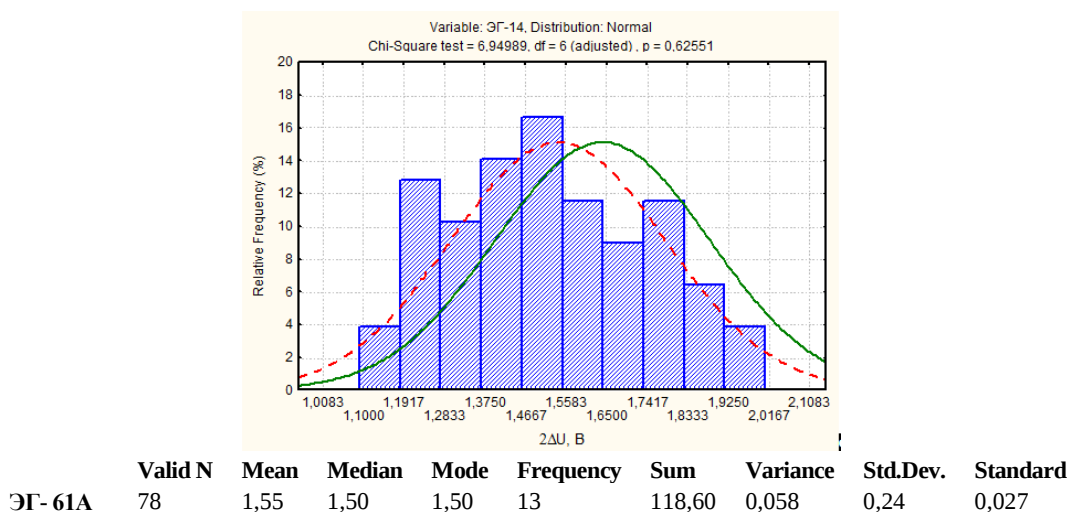


Рис. 5. Гистограмма распределения переходного падения напряжения $2\Delta U$ на пару щёток ЭГ-14

На гистограммах рис. 5, 6 изображены усреднённые кривые: по экспериментальным данным – сплошная зелёная и по проектируемым – пунктирная. Для того, чтобы усилить благоприятное влияние падения напряжений $u_1 + u_2$ на процесс коммутации, в машинах постоянного тока с затрудненной коммутацией применяют щетки с большим переходным сопротивлением, несмотря на то, что это увеличивает потери мощности в переходном контакте.

Выводы

1. Результаты статистического анализа распределения величины переходного падения напряжения на пару щёток показали, что данная величина распределена по нормальному закону распределения как для неразрезных, так и для составных разрезных щёток. Кроме того, математическое ожидание значения падения напряжения на пару щёток $2\Delta U$ для разрезных щёток в среднем на 6–10 % больше, чем для неразрезных, но это не превышает требований ТУ.

2. Большое значение дисперсии величины падения напряжения на пару щёток для электрощётки типа ЭГ-61А указывает на нестабильность её характеристик, что подтверждает неоднократные упоминания об этом в литературе.

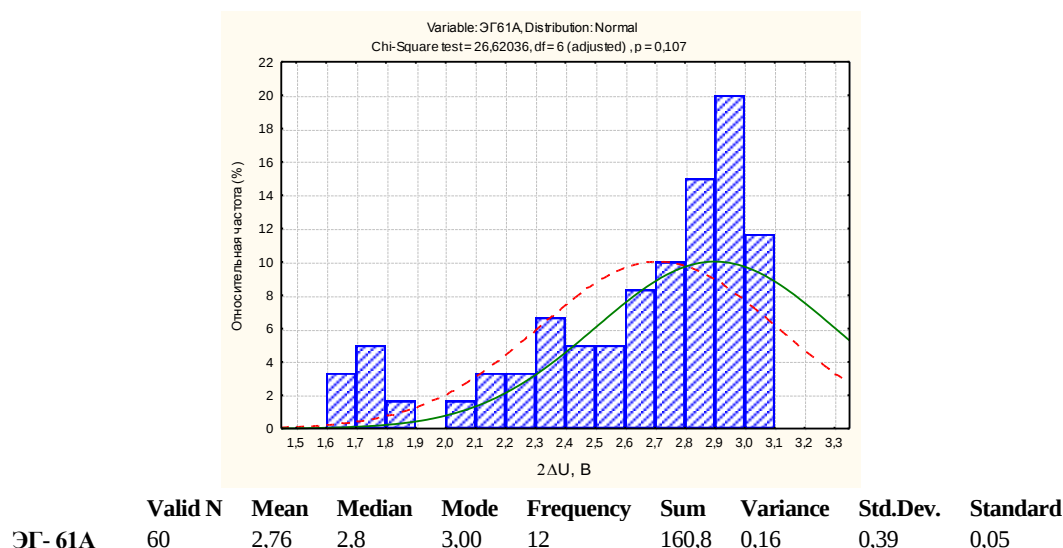


Рис. 6. Гистограмма распределения переходного падения напряжения $2\Delta U$ на пару щеток ЭГ-61А

3. Исследования зависимости величины падения напряжения на пару щеток $2\Delta U$ от времени показали, что для неразрезных щеток характерно увеличение $2\Delta U$, что связано с ростом температуры, а для составных разрезных – уменьшение падения $2\Delta U$ из-за приработки поверхности контакта частей составных разрезной щетки. В связи с этим необходимо обеспечивать поверхность соприкосновения частей составных щеток не менее 90% контактной поверхности в поперечном разрезе тела щетки.

4. Полученные положительные результаты исследований, выполненных на установке КЗК-95, позволяют рекомендовать проведение эксплуатационных испытаний предложенного конструктивного решения составных щёток с поперечным разрезом на электроподвижном составе.

5. Существенно сокращаются расходы на эксплуатацию электрических машин в различных отраслях промышленности за счёт экономии на отходах, возникающих при эксплуатации серийных электрощёток.

Литература

1. Пат. 51792 РФ, МПК H01R 39/40. Щёточный узел электрической машины / Идиятуллин Р.Г. заявл. 30.06.2005, опубл. 27.02.2006. Бюл. № 6.
2. Пат. 2365005 РФ, МПК H01R 39/18. Составная разъёмная щётка с замковой частью / Степанов Е.Л., Рылов Ю.А., заявл. 16.11.2007, опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23.
3. Харламов В.В., Долгова А.В. и др. Определение диагностических параметров для оценки состояния профиля коллектора тягового электродвигателя // Омский научный вестник. Сер. «Приборы, машины и технологии». 2011. Вып. 1 (97). С. 121.
4. Харламов В.В., Шкодун П.К., Долгова А.В. Алгоритм оценки износа коллектора тягового электродвигателя // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе: Материалы науч.практ. конф. Сибирский гос. ун-т путей сообщения. Новосибирск, 2012. С. 378–380.
5. Ахмедзянов Г., Харламов В.В. Совершенствование диагностирования коллекторно-щёточного узла. Изд. LAP Lambert Academic Publishing, ISBN: 9783659380150. С. 168.
6. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: утверждена Правительством Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877р. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (дата обращения: 07.11.2015).
7. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-

щетоchnого узла тяговых электродвигателей электропоездов: монография / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.В. Долгова, Д.А. Ахуннов. Омск: Омский гос. Ун-т путей сообщения, 2015. 198 с.

8. Авилов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. Омск: Омский научный вестник, 2013. 356 с.

9. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henao, G.A. Capolino, M. Fernandez Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pucsa, M. Riera Guasp, S. Hedayati Kia // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014. V. 8, No. 2. P. 31–42.

10. Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis / A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin Kelm. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2012. 272 p.

Автор публикации

Филина Ольга Алексеевна – старший преподаватель, аспирант кафедры «Электротехнические комплексы и системы» (ЭТКС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: olga_yuminova83@mail.ru.

References

1. Pat. 51792 RF, MPK H01R 39/40. Shchetchnyi uzel elektricheskoi mashiny /Idiyatullin R.G. zayavl. 30.06.2005, opubl. 27.02.2006. Byul. No. 6.

2. Pat. 2365005 RF, MPK H01R 39/18. Sostavnaya raz`emnaya shchotka s zamkovoй chast'yu / Stepanov E.L., Rylov Yu.A., zayavl. 16.11.2007, opubl. 20.08.2009. Byul. No. 23.

3. Kharlamov V.V., Dolgova A.V. i dr. Opredelenie diagnosticheskikh parametrov dlya otsenki sostoyaniya profilya kollektora tyagovogo elektrodvigatelya // Omskii nauchnyi vestnik. Ser. «Pribory, mashiny i tekhnologii». 2011. Vyp. 1 (97). P. 121.

4. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Dolgova A.V. Algoritm otsenki iznosa kollektora tyagovogo elektrodvigatelya // Innovatsionnye faktory razvitiya Transsiba na sovremennom etape: Materialy nauch.prakt. konf. Sibirskii gos. un-t putei soobshcheniya. Novosibirsk, 2012. P. 378–380.

5. Akhmedzyanov G., Kharlamov V.V. Sovershenstvovanie diagnostirovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla. Izd. LAP Lambert Academic Publishing, ISBN: 9783659380150. P. 168.

6. Strategiya razvitiya zhelezнодорожного транспорта v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda: utverzhdena Pravitel'stvom Rossiiskoi Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. No. 877r. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (data obrashcheniya: 07.11.2015).

7. Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigatelei elektrovozov: monografiya / V.V. Kharlamov, P.K. Shkodun, A.V. Dolgova, D.A. Akhunov. Omsk: Omskii gos. Un-t putei soobshcheniya, 2015. 198 p.

8. Avilov V.D. Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollektornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka: monografiya. Omsk: Omskii nauchnyi vestnik, 2013. 356 p.

9. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henao, G.A. Capolino, M. Fernandez Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pucsa, M. Riera Guasp, S. Hedayati Kia // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014. V. 8, No. 2. P. 31–42.

10. Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis / A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin Kelm. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2012. 272 p.

The author of the publication

Olga A. Filina – senior lecturer, postgraduate Department of Electro technical complexes and systems of the Kazan state power engineering University. E-mail: olga_yuminova83@mail.ru.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Д.В. Сердечный, Ю.Б. Томашевский

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия
serdechnyy.denis@gmail.com

Резюме: Рассмотрена актуальная задача повышения эффективности накопителей энергии на базе многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей. Описаны назначение и функции системы контроля и управления аккумуляторной батареей, осуществляющей процесс зарядки и балансировки и улучшающей эксплуатационные характеристики накопителя. Представлены результаты применения методики поиска оптимального соотношения времени заряда и числа циклов заряд/балансировка.

Ключевые слова: энергосистема, литий-ионный аккумулятор, накопитель, балансировка, емкость.

FEATURES OF USING OF ENERGY STORAGE BASED MULTI-ELEMENT LITHIUM-ION BATTERY

D.V. Serdechnyy, Yu.B. Tomashevskiy

State Technical Yuri Gagarin University of Saratov, Saratov, Russia
serdechnyy.denis@gmail.com

Abstract: The actual problem of increasing the efficiency of energy storage devices based on multi-element lithium-ion batteries is considered. The purpose and functions of a battery monitoring and control system that monitors the parameters and controls the charging and balancing process and improves the performance of the drive are considered. Practical application of the technique of searching for the optimal ratio of the charge time and the number of charging / balancing cycles has been made.

Keywords: energy system, lithium-ion battery, accumulator, balancing, capacity.

Введение

В последнее время в качестве источника питания для различных мобильных и автономных энергетических систем все чаще используются литий-ионные аккумуляторы. Среди областей применения литий-ионных аккумуляторов также можно выделить системы накопления и распределения электрической энергии *Smart grid*, источники питания для электрических и гибридных транспортных средств, в том числе мелкого коммерческого, складского транспорта [1].

Этот тип аккумулятора имеет ряд преимуществ по сравнению с другими, отличаясь относительно высоким рабочим напряжением (в среднем 3,2 В), приемлемыми массогабаритными характеристиками, высокой плотностью энергии, отсутствием эффекта памяти, низким саморазрядом, возможностью эксплуатации в широком диапазоне температур

[2]. При этом литиевые батареи требуют более пристального контроля основных параметров: напряжения, температуры и тока. Задача управления при переходе к многоэлементной структуре литиевых аккумуляторных систем заметно усложняется. Ее решение в этом случае является актуальным и способствует эффективной эксплуатации накопителя в целом.

Методика исследования

Литий-ионные аккумуляторы чувствительны к превышению критических уровней напряжения, токов и температуры, что может привести к необратимым процессам в структуре самой батареи, повреждению ее и, как следствие, к снижению производительности накопителя энергии [3]. К тому же, в отличие от традиционных свинцово-кислотных аккумуляторов или NiMH [4–6], литиевые аккумуляторы при последовательном соединении подвержены эффекту разбаланса напряжений и уровня заряда аккумуляторных ячеек вследствие различия значений внутреннего сопротивления и фактической емкости аккумуляторов [7].

По достижении хотя бы одной из ячеек критического напряжения при разряде необходимо отключить накопитель от нагрузки, так как дальнейший разряд повлечет нарушение требований эксплуатации. В этом случае емкость батареи будет определяться емкостью самой слабой ячейки. При эксплуатации литий-ионной батареи есть особенности в определении состояния уровня заряда (*SOC – state of charge*). Не представляется возможным связать состояние уровня заряда с напряжением батареи [2; 4; 7]. Состояние заряда должно быть связано с фактической емкостью аккумулятора. Значение емкости батареи C устанавливается производителем батареи с заданным диапазоном и определяется экспериментально, путем разряда постоянным током I полностью заряженного аккумулятора с напряжением $U_{\max}$ до уровня критически минимального напряжения $U_{\min}$.

Таким образом, в основе безопасной и эффективной эксплуатации литий-ионных батарей лежит непрерывный контроль за основными параметрами аккумулятора, а также мониторинг и управление процессом заряда и балансировки.

Для решения этих задач разрабатывается состоящая из отдельных модулей система контроля и управления (СКУ) многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареей, которая будет производить контроль значений напряжений, температуры отдельных аккумуляторных ячеек и тока через батарею.

Система контроля и управления предназначена для управления процессом зарядки, балансировки, вычисления уровня заряда и индикации аварийных и штатных состояний батареи. Система выполняет: контроль температуры батареи; контроль состояния заряда или глубины разряда батареи; контроль и ограничение текущего значения тока через батарею (заряда-разряда); контроль значений напряжений отдельных ячеек и защиты от превышения критических уровней напряжений $U_{\max}$ и $U_{\min}$ на ячейках во время заряда и разряда посредством отключения от нагрузки при помощи контактора S . Таким образом, система обеспечивает безопасную работу батареи в режимах разряда (работы на нагрузку), заряда батареи, балансировки батареи.

Система включает в себя балансировочные резисторы R_n , коммутируемые электронными ключами S_n , для балансировки аккумуляторных ячеек пассивным методом; термодатчики; датчик тока (ДТ); устройство звуковой сигнализации и отображения текущего состояния системы. Пример реализации системы показан на рис. 1.

Номинальное напряжение отдельного аккумулятора может варьироваться в диапазоне от 2,4 до 3,7 В в зависимости от структуры и типа. Наиболее безопасным и хорошо зарекомендовавшим типом тягового литий-ионного аккумулятора является железо-фосфатная литий-ионная батарея LiFePO_4 . Современные производители батареи могут предложить для различных применений широкий спектр аккумуляторных ячеек различных емкостей и форм факторов с номинальным напряжением 3,2 В [8].

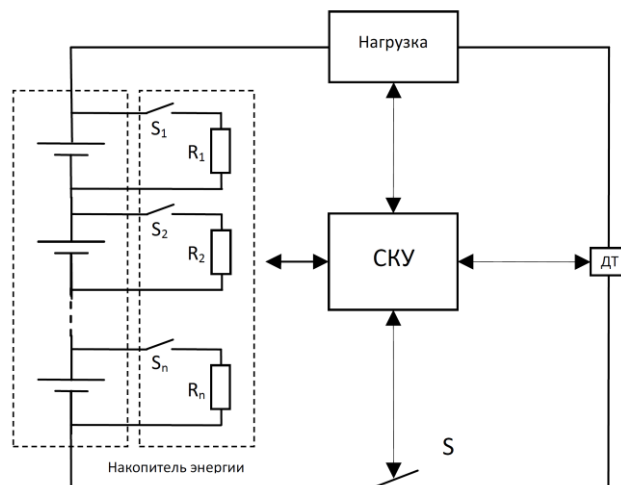


Рис. 1. Структура системы контроля и управления накопителем

При формировании накопителя с необходимыми значениями мощности и массо-габаритными ограничениями возникает инженерная задача формирования многоэлементной литий-ионной батареи из ячеек с определенными эксплуатационными параметрами ($U_{\min}$, $U_{\max}$, $I_{\max,з}$, $I_{\max,р}$, $T_{\min}$, $T_{\max}$), не превышая при этом их критических значений в процессе эксплуатации. Здесь $I_{\max,з}$, $I_{\max,р}$ — максимальные значения токов заряда и разряда соответственно, а $T_{\min}$, $T_{\max}$ — минимальные и максимальные значения температуры аккумуляторных ячеек.

Достижение необходимых значений напряжений и емкости накопителя энергии осуществляется путем последовательного, параллельного, последовательно-параллельного и параллельно-последовательного соединения.

При последовательном соединении и возникает эффект разбаланса. Разбаланс обусловлен возникновением разброса напряжений и уровней заряда отдельных аккумуляторных ячеек («разбаланс ячеек»). По достижении хотя бы одной из ячеек критического напряжения при разряде необходимо отключить накопитель от нагрузки, так как дальнейший разряд повлечет нарушение требований эксплуатации. В этом случае емкость батареи будет определяться емкостью самой слабой ячейки. Для устранения этого эффекта предусматривается процедура балансировки аккумуляторных ячеек в процессе зарядки или эксплуатации [9]. Процесс зарядки и балансировки проводился по алгоритму, рассмотренному в работе [10]. Балансировочные циклы чередовались с циклами зарядки, оптимальное количество циклов балансировки для конкурентной конфигурации накопителя составило $k = 6$.

Основные результаты

В качестве объекта для исследований был выбран элемент питания электротранспортного средства — погрузчика емкостью $C = 300$ Ач и номинальным напряжением $U_n = 48$ В. Накопитель представляет собой последовательно соединенную многоэлементную литий-ионную батарею, состоящую из 15 ячеек производства компании *Shenzhen Smart Lion Power Battery Limited (China, Shenzhen)* емкостью $C=300$ Ач и с напряжением $U_n=3,2$ В.

В соответствии с рекомендациями производителя [11] были установлены следующие критические параметры: $U_{\min} = 2,7$ В; $U_{\max} = 4$ В; $I_{\max,з} = 60$ А; $I_{\max,р} = 100$ А; $t_{\max} = 50^\circ\text{C}$. На зарядку накопителя током $I_{\max,з} = 60$ А было затрачено $t_3 = 314$ мин.

СКУ производился разряд накопителя током $I_p = 50$ А от заряженного состояния $SOC = 100\%$ до критического уровня минимального напряжения $U_{\min} = 2,7$ В. Время разряда накопителя составило $t = 358$ мин (рис. 2).

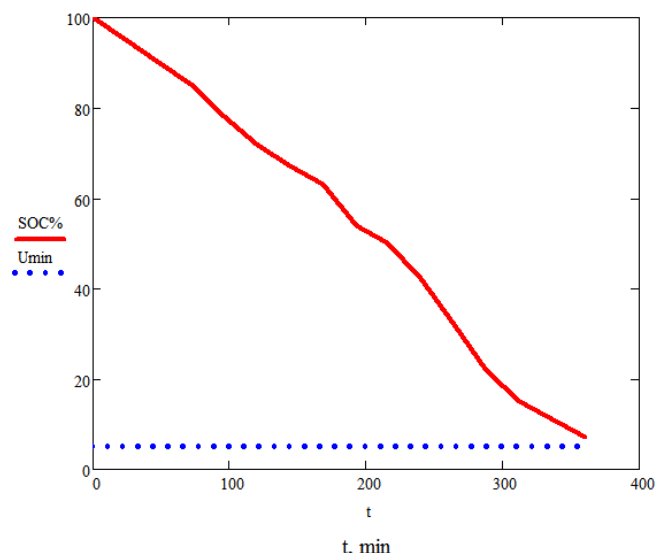


Рис. 2. Разряд накопителя энергии: SOC – состояние уровня заряда; $U_{\min}$ – критически минимальное напряжение; t – время разряда накопителя

Обсуждение результатов

Количество циклов балансировки оказывает влияние на эксплуатационные характеристики многоэлементной литий-ионной батареи. Для рассмотренной конфигурации батареи оптимальное число балансировочных циклов $k = 6$; при таком значении параметра было достигнуто приемлемое соотношение времени разряда и заряда накопителя энергии для электропозвучника. Изменяя значения параметров зарядного процесса, возможно заряжать электротранспортное средство за заданное время, обеспечивая при этом необходимую продолжительность работы.

Выводы

1. Показаны особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной батареи, а также назначение и функции, выполняемые системой контроля и управления накопителем.
2. Осуществлена экспериментальная проверка методики [10] выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи, основанная на поиске компромисса между увеличением максимального времени ее разряда и уменьшением разбаланса напряжений заряжаемых ячеек.

Литература

1. Global report on renewable energy sources international organization for the support of renewable energy. www.ren21.net URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> (дата обращения: 01.06.2017).
2. Pistoia G. LithiumIon Batteries: Advances and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2013. 634 p.
3. Wang Q., Ping P., Zhao X., Guanquan C., Sun J., Chen C. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery // Journal of The Electrochemical Society. 2011. № 3. P. 1–25.
4. Tarascon J., Armand M Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries // Nature. 2001. №414. P. 359–367.

5. Sexton E. Improved Charge Algorithms for Valve Regulated Lead Acid Batteries // Proceedings of the 15 th Annual Battery Conference on Applications and Advances. 1999. № 11. P. 211–216.
6. Corrigan D. Ovonic Nickel-Metal Hydride Electric Vehicle Batteries / The 12th International Electric Vehicle Symposium (EVS-12). 1994. № 14. P. 16–21.
7. Rahimi H., Ojha U., Baronti F., Chow M Battery Management System: An Overview of its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles // Industrial Electronics Magazine. 2013. № 2. P. 4–16.
8. Сравнение типов батарей. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_battery_types (дата обращения: 31.05.2017)..
9. Moore S., Schneider P. Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems // Society of Automotive Engineers. 2001. № 1. P. 9–13.
10. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Определение параметров балансировочного процесса многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей. Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016. Саратов: Материалы международной научно-технической конференции, 2016. С. 531–537.
11. Указания по эксплуатации. URL: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp300aha?category_id=176 (дата обращения: 02.06.2017).

Авторы публикации

Сердечный Денис Владимирович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (СГТУ им. Гагарина Ю.А.). E-mail: serdechnyy.denis@gmail.com.

Томашевский Юрий Болеславович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (СГТУ им. Гагарина Ю.А.).

References

1. Global report on renewable energy sources international organization for the support of renewable energy. <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> (дата обращения: 01.06.2017).
2. Pistoia G. Lithium Ion Batteries: Advances and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2013. 634 p.
3. Wang Q., Ping P., Zhao X., Guanquan C., Sun J., Chen C. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. Journal of The Electrochemical Society. 2011. No. 3. P. 1–25.
4. Tarascon J., Armand M Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature. 2001. No. 414. P. 359–367.
5. Sexton E. Improved Charge Algorithms for Valve Regulated Lead Acid Batteries. Proceedings of the 15 th Annual Battery Conference on Applications and Advances. 1999. No. 11. P. 211–216.
6. Corrigan, D. Ovonic Nickel-Metal Hydride Electric Vehicle Batteries. The 12th International Electric Vehicle Symposium (EVS-12). 1994. No. 14. P. 16–21.
7. Rahimi H., Ojha U., Baronti F., Chow M Battery Management System: An Overview of its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. Industrial Electronics Magazine. 2013. No. 2. P. 4–16.
8. Comparison_of_battery_types. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_battery_types (date of the application: 31.05.2017).
9. Moore S., Schneider P. Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems. Society of Automotive Engineers. 2001. No. 1. P. 9–13.
10. Serdechnyy D.V., Tomshevskiy Yu.B.. Determination of the parameters of balancing process of multielement lithium ion batteries. Actual problems of electron devices engineering. Saratov: Materials of the International Scientific and Technical Conference, 2016. P. 531–537.
11. Instructions. http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp300aha?category_id=176 (date of reference: 02.06.2017).

Authors of the publication

Denis V. Serdechnyy – post-graduate student, Department of “System Engineering”, Yuri Gagarin state technical university of Saratov.

Yury B. Tomashevskiy – Dr. Sci. (Techn.), professor, head of the Department “System Engineering”, Yuri Gagarin state technical university of Saratov.

Поступила в редакцию

13 июля 2017 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.2:628.9

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП ПРИ РАБОТЕ В РАЗНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Айхайти Исыхакэфу, Р.Х. Тукшаитов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ahat1107@mail.ru

Резюме: Определена температура корпуса светодиодных ламп при разных условиях их эксплуатации в осветительных устройствах. Показано, что создание вентиляционных отверстий в плафоне или в системе крепления позволяет понизить температуру корпуса светодиодных ламп на 10–25% и этим значительно повысить срок их службы.

Ключевые слова: контроль, температура корпуса, плафон, вентиляционное отверстие, срок службы.

Благодарности: Выражаем благодарность Президенту группы компаний МАКСОМ Н.Х. Вахидову за консультацию по вопросу современных технологий изготовления светотехнических плафонов, в период посещения КГЭУ, и предоставление усовершенствованных образцов для дальнейших их испытаний.

CONTROL THE BODY TEMPERATURE OF LED LAMPS AT WORK IN DIFFERENT LIGHTING DEVICES

Aihaiti Yisihaketu, Tukshaitov R.H

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ahat1107@mail.ru

Abstract: The temperature of the housing of LED lamps is determined under different conditions of their operation in lighting devices. It is shown that the creation of ventilation holes in the plafond or in the system of its fastening allows to lower the body temperature of LED lamps by 10–25% and thereby significantly increase the service life.

Keywords: control, body temperature, plafond, ventilation hole, service life.

Acknowledgments: We express our gratitude to the President of the MAK group of companies Vakhidov N.Kh. for consultation on the issue of modern technologies for the production of lighting fixtures during the visit to KSPU and providing the improved samples for further testing.

С целью дальнейшего обеспечения энергосбережения Правительство РФ приняло решение применять во вновь строящихся зданиях только светодиодные осветительные приборы [1]. Осветительное устройство, используемое в одно- и многорожковых люстрах, состоит из светодиодной лампы (СДЛ), плафона, электрического патрона, фиксирующих

элементов и подводящих электричество проводов. Температура светодиодов в значительной степени определяет срок службы осветительных светодиодных ламп [2; 3]. Чем выше температура p - n перехода светодиодов драйверов в светодиодные светильники (СДЛ), тем меньше срок их службы. Учитывая это, целый ряд работ посвящен изысканию теоретических и экспериментальных способов понижения температуры СДЛ в процессе ее конструирования [4–7]. Снижение температуры светодиодов и электрических конденсаторов в используемых в СДЛ драйверах всего на 1°C способствует повышению срока их службы соответственно на 1500–2000 и 2000–4000 ч. [8]. Все это указывает на важность контроля температуры корпуса СДЛ и изыскания способов снижения температуры корпуса СДЛ даже на несколько градусов при размещении их в разные осветительные устройства. Несмотря на это, в выпускаемых последние годы СДЛ еще в меньшей степени стали уделять внимание отводу тепла от светодиодов. Актуальность поднятого вопроса обусловлена и тем, что в последние годы производители снизили уровень теплоотвода в СДЛ с целью их удешевления. В то же время срок службы СДЛ указывается, как и в прошлые годы, равным 25–30 тыс. часов [3]. Выпуск СДЛ так называемого эконо-класса привел к уменьшению их массы в 1,5–2,0 раза, что, в свою очередь, привело к большему их перегреву и, соответственно, к преждевременному выходу из строя. Причем опрос дилеров СДЛ свидетельствует о том, что выход из строя СДЛ происходит в большей степени за счет возникновения неисправности драйвера.

В связи с этим поставлена задача изучить пути уменьшения температуры корпуса СДЛ и разработать ее критериальные значения. Испытывались СДЛ разных фирм 2016 года выпуска при разных условиях их эксплуатации в осветительном устройстве: при вертикальном их положении цоколем вверх, вниз и размещении вне плафона, а также при размещении в типовом плафоне, усовершенствованном плафоне и модернизированном осветительном устройстве, с целью изыскания оптимальных способов отведения тепла. Измерение температуры осуществлялось термоэлектрическим прибором AZ8803 через 60 мин. после включения СДЛ, то есть после полной стабилизации температуры. Погружение датчика в плафон и его контакт с корпусом на соответствующих двух уровнях обеспечивали через небольшие отверстия в плафоне.

В результате проведенных исследований установлено, что максимальная температура корпуса СДЛ оптимальной мощностью 9–10 Вт при размещении ее вне плафона практически при обоих ее положениях практически не превышает 55 – 60°C (табл. 1).

Таблица 1
Температура поверхности СДЛ при размещении вне плафона через 60 минут после их включения

№	Тип СДЛ	Ламп цоколем вверх		Лампа цоколем вниз	
		Температура в области СДМ, $^{\circ}\text{C}$	Температура в области драйвера, $^{\circ}\text{C}$	Температура в области СДМ, $^{\circ}\text{C}$	Температура в области драйвера, $^{\circ}\text{C}$
1	<i>Kontex</i> 10BT	49	54	53	49
2	Онлайн 10BT	63	53	62	57
3	<i>Gaus</i> 10 Вт	48	60	50	49
4	<i>Wolta</i> 9 BT	38	52	43	40
5	ЭРА 10 BT	56	51	49	46
6	<i>HNFE</i> 9 Вт	45	57	51	48

Главное отличие заключается в том, что при положении СДЛ цоколем вверх максимальная температура отмечается в области расположения в нем драйвера, а при положении ее цоколем вниз – в области светодиодного модуля.

При размещении СДЛ в типовом плафоне максимальная температура корпуса при положении лампы цоколем вверх достигает 92°C , и несколько меньшее значение (порядка на 10°C) – при положении лампы цоколем вниз. Это позволяет говорить, что температура непосредственно светодиодов имеет еще большую температуру, приближающуюся к предельно

допустимому значению (120°C). Некоторые результаты проведенных испытаний СДЛ при размещении их в плафоне цоколем вверх с отверстиями и без них представлены в табл. 2.

Таблица 2
Температура светодиодного модуля и патрона СДЛ при размещении в плафоне с отверстиями цоколем вверх через 60 минут после их включения

№	Тип СДЛ	Температура в области СДМ, $^{\circ}\text{C}$		Температура в области патрона с драйвером, $^{\circ}\text{C}$	
		Обычный плафон	Усовершенствованный плафон	Обычный плафон	Усовершенствованный плафон
1	<i>Kontex</i> 10BT	81	60	92	66
2	Онлайн 10BT	81	59	92	67
3	<i>Gaus</i> 10 Вт	67	50	88	66
4	<i>Wolta</i> 9 BT	65	50	70	56
5	ЭРА 10 BT	72	53	82	62
6	<i>HNFE</i> 9 Вт	61	54	71	59

Возможность определенного снижения температуры корпуса в плафоне впервые было показано в работах [9; 10]. Поэтому имелась целесообразность оценить степень снижения температуры при разных условиях эксплуатации СДЛ и разных технических решениях. При создании 4–8 круглых отверстий диаметром 5–8 мм у основания плафона температура корпуса снижается на $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ за счет создания восходящего конвекционного потока. Эффективность теплоотвода тем выше, чем ближе расположены вентиляционные отверстия к горловине плафона. Проведенные несколько консультаций с Президентом группы компаний МАКСОМ, выпускающей светотехническое стекло, стеклянные плафоны и светильники, привели к заключению, что производить плафоны с вентиляционными отверстиями при существующих технологиях их изготовления достаточно сложно. По его мнению отверстия в плафонах могут быть созданы сверлением, но в этом случае будет увеличиваться брак, что вызовет удорожание изделий. Вместе с тем, полученные результаты создали определенную базу для последующего поиска новых технологий изготовления таких плафонов.

В связи с возникшей проблемой изготовления плафонов соответствующей конструкции снижение температуры корпуса СДЛ решено осуществить созданием для вентиляции отверстий в фиксирующих гайках патрона, используя при этом для отвода воздушного потока зазор между патроном и отверстием в торце плафона. В фиксирующих плафон гайках патрона было просверлено по 8 отверстий диаметром 4 мм. Результаты опытов показывают, что данный способ позволяет, даже при существующих малых зазорах и примененном исполнении, понизить температуру корпуса СДЛ приблизительно на $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$. Некоторое увеличение диаметра горловины плафона позволит обеспечить снижение температуры корпуса еще на большую величину. Установлено, что форма конструкции СДЛ также влияет на температурный режим. Так, применение «кувшинообразной» формы в СДЛ *Wolta* способствует изменению схемы циркуляции воздуха в плафоне и, соответственно, меньшему нагреву как драйвера, так и СДЛ приблизительно на 10°C . Можно обеспечить отвод тепла с помощью модернизированного электрического патрона [11], но при этом достигается меньший эффект [12].

Если сохранить прежнее значение температуры корпуса СДЛ, которое имело место в обычном плафоне без специальной конвекции воздуха, то можно в этом случае еще в большей степени удешевить производство ламп за счет увеличения токовой нагрузки на светодиоды и уменьшения количества светодиодов.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложен достаточно эффективный способ снижения температуры корпуса СДЛ и существенного предотвращения снижения срока их службы, заключающийся в создании вентиляционных отверстий в плафоне или корпусе его крепления в осветительном устройстве, практически

реализуемый при производстве ламп. Установлены предельные значения температур корпуса СДЛ при разных способах их эксплуатации, которые следует использовать в качестве контрольных величин.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 28.08.2015 № 898 «О внесении изменений в п. 7 Правил установления требований энергетической эффективности товаров, работ, услуг при осуществлении закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд».
2. Петропавловский Ю. Современные светодиодные продукты компаний Verbatim/Mutsibishi // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 3. С. 60–65.
3. Светодиодные и энергосберегающие лампы «Экономка» // Современная светотехника. 2016. № 5. С. 52.
4. Evdokimov Y.K., Martemianov S. Continuously distributed sensors for steady-state temperature profile measurements: main principles and numerical algorithm // International journal of heat and mass transfer. 2004. Т. 47. № 2. Р. 329–340.
5. Ашрятов А.А., Кокинов А.М., Микаева С.А. Исследование линейных светодиодных ламп. Естественные и технические науки. 2012. № 6. С. 338–353.
6. Смирнов В., Кондратьев А., Лебедев И., Абалов А. Комплексный подход к подбору компонентов для изготовления светотехнических изделий // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 4. С. 26–29.
7. Корнич А. Обзор конфигураций систем охлаждения мощных светодиодных светильников // Современная светотехника. № 16. № 3. С. 23–28.
8. Мэгги Наджими. Концепции, продлевающие срок службы светодиодных драйверов // Полупроводниковая светотехника. 2017. № 2. С. 44–47.
9. Тукшаитов Р.Х., Исахов А.Р., Айхайти Исыхакэфу, Гарипов Р.Р. О новых возможностях способах повышения срока службы светодиодных ламп // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. науч. тр. XII научно-технической конференции. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2013. С. 282–284.
10. Пат. 121552 RU, МПК F21S 8/00. Плафон для светодиодной лампы / Тукшаитов Р.Х., Маркин Ю.С.; заявл. 25.05.2012, опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
11. Пат. 163832 RU, МПК H01R 33/44. Электрический патрон для светодиодной лампы / Курмаев И.Х., Тукшаитов Р.Х., Гарипов Р.Р., Исахов А.Ф.; заявл. 27.10.2015, опубл. 10.08.2016. Бюл. № 30.
12. Тукшаитов Р.Х., Айхайти Исыхакэфу, Нигматуллин Р.М., Гарипов Р.Р. Как обеспечить заявленный срок службы светодиодных ламп // Полупроводниковая светотехника 2016. № 3. Т. 41. С. 6–9.

Авторы публикации

Айхайти Исыхакэфу — инженер кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ahat1107@mail.ru

Тукшаитов Рафаил Хасьянович — д-р биол. наук, профессор, кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 898 of August 28, 2015 "on Amendments to Clause 7 of the Rules for Establishing Energy Efficiency Requirements for Goods, Works and Services in the Conduct of Procurement for Ensuring State and Municipal Needs".
2. Petropavlovsky Yu. Modern LED products of Verbatim. Mutsibishi companies // Semiconductor lighting engineering. 2014. No. 3. P. 60–65.
3. LED and energy-saving lamps "Ekonomika". Modern lighting technology. 2016. No. 5. P. 52.

4. Evdokimov Y.K., Martemianov S. Continuously distributed sensors for steady-state temperature profile measurements: main principles and numerical algorithm // International journal of heat and mass transfer. 2004. T. 47. No. 2. P. 329–340.
5. Ashryatov A.A, Kokinov A.M, Mikaeva S.A. Investigation of linear LED lamps // Natural and technical sciences. 2012. No. 6. P. 338–353.
6. Smirnov V., Kondratiev A., Lebedev I., Abalov A. Complex approach to the selection of components for the manufacture of lighting products // Semiconductor lighting engineering. 2014. No. 4. P. 26–29.
7. Kornich A. Overview of the configurations of cooling systems for high-power LED fixtures // Modern lighting technology. No. 16. No. 3. P. 23–28.
8. Maggie Najee. Concepts that extend the life service of the LED driver // Semiconductor lighting. 2017. No. 2. P. 44–47.
9. Tukshaitov R.H., Iskhakov A.R, Aihaiti Yisihakefu, Garipov R.R. About new possibilities of ways to increase the service life of LED lamps // Problems and prospects for the development of domestic lighting, electrical engineering and energy: Sat. Sci. Tr. XII scientific and technical conference. Saransk: Moscow State University. N.P. Ogareva, 2013. P. 282–284.
10. Pat. 121552 RU, MPK F21S 8/00. Plafon dlya svetodiodnoi lampy / Tukshaitov R.Kh., Markin Yu.S.; zayavl. 25.05.2012, opubl. 27.10.2012. Byul. № 30.
11. Pat. 163832 RU, MPK H01R 33/44. Elektricheskii patron dlya svetodiodnoi lampy / Kurmaev I.Kh., Tukshaitov R.Kh., Garipov R.R., Iskhakov A.F.; zayavl. 27.10.2015, opubl. 10.08.2016. Byul. № 30. Tukshaitov R.H., Aihaiti Yisihakefu, Nigmatullin RM, Garipov R.R. How to ensure the declared service life of LED lamps // Semiconductor lighting equipment 2016. No. 3. V. 41. P. 6–9.

Authors of the publication

Aihaiti Yisihakefu – engineer of the Department “Industrial Electronics and Lighting technology”, Kazan State Power Engineering University.

Rafail H. Tukshaitov – Dr. Sci. (Biology), professor, Department “Industrial Electronics and Lighting”, Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

19 июня 2017 г.

CONTENTS

ENERGETICS

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 2. burning oil hot water boiler kv-gm-100(116,3/150).	3
DOLZHIKOV A.S., MOGORICHNY V.I. Experimental stand for investigation boiling of mixtures used in low-temperature technique.	11
GAFUROV A.M., OSIPOV B.M., GATIN R.Z., GAFUROV N.M Possible ways of decrease in emissions of carbon dioxide gas.	21
KOROBENNIKOV S.M., LYUTIKOVA M.N. Liquid insulating materials moisture content control methods. condition and problems	32
SALTANAEVA E.A., TAIMAROV M.A., AHMETOVA R.V., SUGANUULLIN R.G., AL ZUBAIDI ALI NALIB SALIH Thermal flows from the torch in boilers with a different burner.	50
GARIFULLIN M.SH., GINIATULLIN R.A., KOZLOV V.K., REZATDINOV R.L., RIZVANOVA G.I. Determination of technology of manufacture and mark of mineral transformer oils by their optical spectra.	59
ANTONOV A.I. Study of the level of electromagnetic interference in a network with power transformers of various capacities under asymmetric nature of the load.	65
NEPSHA F.S., GLUSHKOVA A.I., VOROBYEVA D.Yu. To the question of providing the correct work of devices of automatic frequency discharge in the kuzbas energy system.	77
AFANASYEVA O.V., GALKEEVA A.A., VAFIN A.R., MINGALEEVA G.R. The analysis of prospects of using coal at the objects of small distributed generation	85
KHVORENKOV D.A., VARFOLOMEYEVA O.I., KOREPANOV E.V. Calculation of temperature-humidity mode of brick and reinforced concrete chimneys walls.	94

ENERGY, METALLURGICAL AND CHEMICAL ENGINEERING

DMITRIEVA O.S., LORAI S.F., ZINUROV V.E., ZVEREVA E.R., SHAGEEV M.F. The definition of the optimal areas of input of solid additives into the air inlet of the boiler.	106
--	-----

PHYSICS

GUUBAYDULLIN D.A., OSIPOV P.P., ALMAKAYEV I.M. Modeling of the fine particles drift in acoustic resonator using cfd-package.	111
MELAMED L.E., PHILIPPOV G.A. Simulation of turbulence as a «vortex backfill».	121

FOR DEFENCE OF THESES

FILINA O.A. A study of the working life of the brushes of a dc motor of rolling stock.	132
SERDECHNY D.V., TOMASHEVSKY Yu.B. Features of using of energy storage based multi-element lithium-ion battery.	139

SHORT MESSAGES

AIKHAYT ISHAKUFU, TUKSHAITOV R.Kh. Control the body temperature of led lamps at work in different lighting devices.	145
---	-----

**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 $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$ 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 полутоновых.

- **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.