



# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3

**Е. В. ПТИЦЫНА  
Д. В. ПТИЦЫН  
А. Б. КУВАЛДИН**

Омский государственный  
технический университет  
Национальный исследовательский  
университет  
«Московский энергетический институт»

## **К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПИТАНИЕМ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

Экспериментально исследованы электрические параметры, спектры излучения и их интегральные характеристики установок, работающих на явлении электрического разряда в газах или парах на примере газоразрядных излучателей низкого давления. Показана эффективность применения тока сложной формы для питания таких установок.

**Ключевые слова:** газоразрядный излучатель низкого давления, электрический режим, потребляемая мощность, ток сложной формы.

В дуговых электрических печах и установках реализуется технологический процесс плавления металлов и их восстановление из окислов при нагреве с использованием свойств электрического разряда в газах или парах металла. Тип разряда

(телющий, искровой, дуговой) определяется условиями во внешней цепи, типом катода, давлением газа или пара. Напряжение в разрядном промежутке и устойчивость горения дуги зависит от рода тока, его полярности и формы [1–7].

В [2, 3] доказано: оптимальный состав гармоник определяется процессами ионизации в электрическом разряде, то есть подвижность заряженных частиц является функцией температуры и частоты. Регулирование спектра частот питающего напряжения и состава гармоник (формы) может быть реализовано с использованием управляемых полупроводниковых приборов (тиристоров) или нелинейных индуктивностей (дросселей). Варианты схем источников питания газоразрядных электротехнологических установок (ЭТУ) с питанием током сложной формы (ТСФ) подробно рассмотрены в [2, 3]. Там же представлены осциллограммы форм тока (напряжения) и соответствующие им спектры гармоник тока для дуговых сталеплавильных печей малой емкости прямого и косвенного нагрева, газоразрядных излучателей высокого и низкого давлений (ВД и НД). Отмечено, что эффективность работы ЭТУ зависит от положения ступеней РПН (ПБВ) силового трансформатора (то есть для достижения эффективного режима работы установки необходимо регулировать форму и амплитуду питающего напряжения).

Повышение энергетической эффективности работы установок, работающих на свойствах электрического разряда, является актуальным по настоящее время. Улучшение качества изделий и увеличение сроков службы зависят, в том числе, и от электрических режимов и процессов в газоразрядном промежутке.

В работе изложены результаты исследований электрических параметров, спектров излучения и интегральных характеристик установок, работа-

ющих на явлении электрического разряда на примере газоразрядных излучателей низкого давления (НД) различной мощности. Такой излучатель обладает следующими преимуществами: при изменении электрического режима позволяет сразу судить об изменениях физических и технологических параметров установки по значениям мощности, потребляемой из сети, коэффициенту мощности, а также интенсивности линий в спектре излучения и интегральным характеристикам: освещенности, световому потоку, параметрам цветовой диаграммы и цветовой температуре излучателя. При этом не требуется длительная временная реализация многочисленных плавов с отбором проб металла и проведением дорогостоящих анализов качества выплавляемых металлов и сплавов. Рассмотрены вопросы целесообразности использования в ЭТУ тока сложной формы (ТСФ), т.е. тока полигармонического состава с частотами гармоник в диапазоне 102–103 Гц для повышения их эффективности.

Напомним, что по способу генерирования оптического излучения (по способу возбуждения атомов и молекул) различают температурные и разрядные оптические излучатели. В разрядных излучателях оптическое излучение преобразуется в излучение электрического разряда. Цвет излучения определяется частотой колебаний, которая неизменно при переходе излучения из одной среды в другую, а длина электромагнитной волны при этом изменяется [1–7].

**Цель работы:** экспериментальное исследование влияния параметров электрических режимов (обычного с питанием синусоидальным током

Таблица 1

	Обычный режим	Новый режим
Напряжение на лампе, В	207,0	153,0 (175,0)
Освещенность, лк	664,2	570,47 (675,7)
Световой поток, лм	8346,7	7168,5 (8491,0)
Температура в разрядном промежутке, К	2063,4	2070,5 (2079,4)
Коэффициент мощности	0,52	0,61 (0,54)

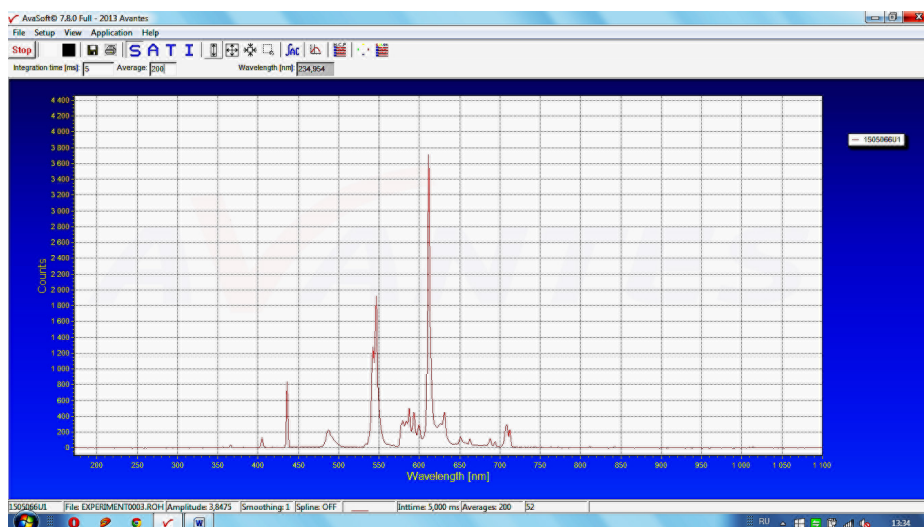


Рис. 1. Спектр газоразрядного излучателя НД мощностью 18 Вт в обычном режиме при напряжении на лампе 207 В

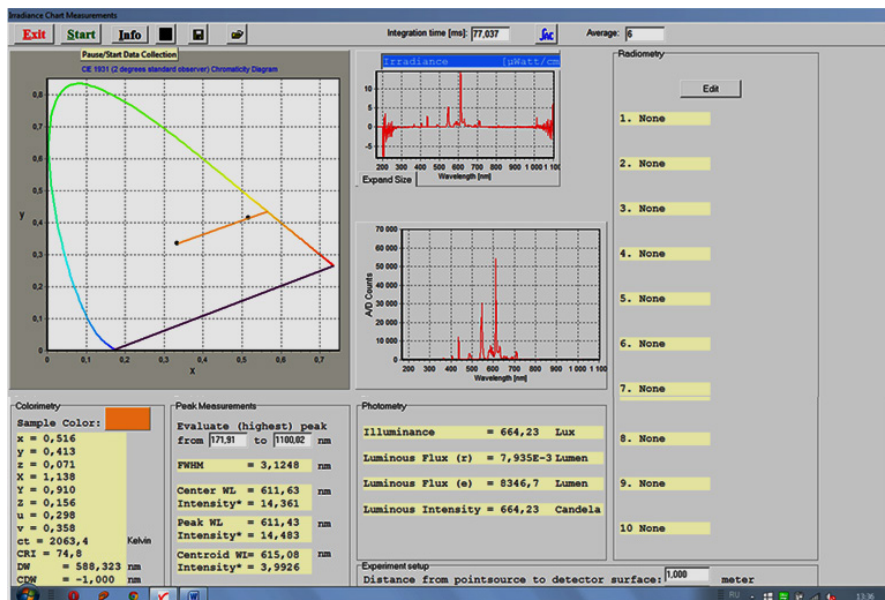


Рис. 2. Окно цветовой диаграммы для газоразрядного излучателя НД мощностью 18 Вт при напряжении 207 В в обычном режиме: хроматические координаты, график поверхностной плотности потока излучения и график данных A/D счета, интегральные параметры

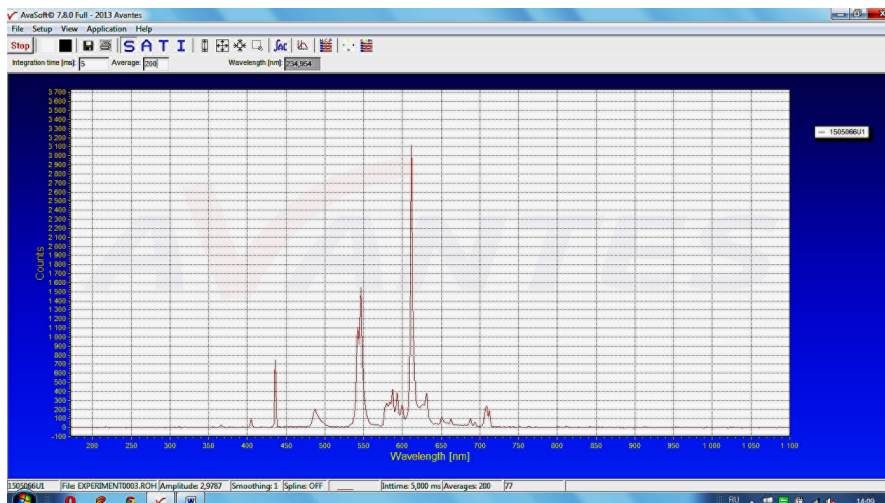


Рис. 3. Спектр газоразрядного излучателя НД в новом режиме с питанием ТСФ. Напряжение на излучателе 153 В

(напряжением) частотой 50 Гц и нового с питанием током сложной формы) на процессы в электрическом разряде и определение энергетической эффективности ЭТУ в режиме с питанием ТСФ.

**Используемые приборы.** В исследованиях применяли следующие измерительные приборы: высокочувствительный оптоволоконный спектрометр с ультрафиолетовым рассеянием света AvaSpec-ULS 2048-USB2, в комплекте которого предусмотрено программное обеспечение AvaSoft-ALL; для измерения электрических параметров установок использован анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060. В экспериментах определяли среднеквадратичные значения токов, напряжений, активной, реактивной, полной мощности, значение коэффициента мощности установки [1–7].

**Первая серия опытов.** Выполнены экспериментальные исследования электрических параметров, спектров излучения, цветовой диаграммы и интегральных характеристик электрического разряда

на примере газоразрядного излучателя НД мощностью 18 Вт. Результаты опытов представлены в сравнении для обычного и нового электрических режимов в табл. 1. Опыты проведены для определения распределения энергии излучения по длинам волн при регулировании формы питающего напряжения на газоразрядном излучателе. В обычном режиме газоразрядный излучатель НД подключали к сети напряжением 220 В частотой 50 Гц через ЛАТР типа SUNTEK с цифровым дисплеем мощностью 2000 ВА, диапазоном изменения напряжения 0–300 В. В новом режиме для регулирования формы тока (напряжения) использовали ДН. В обычном режиме дроссель не использовался. В опыте датчик спектрометра устанавливали на фиксированном расстоянии от излучателя [2–4, 7].

На рис. 1, 2 показаны спектр излучения, окно цветовой диаграммы, интегральные характеристики газоразрядного излучателя НД для обычного режима. Напряжение на излучателе составляло 207 В.

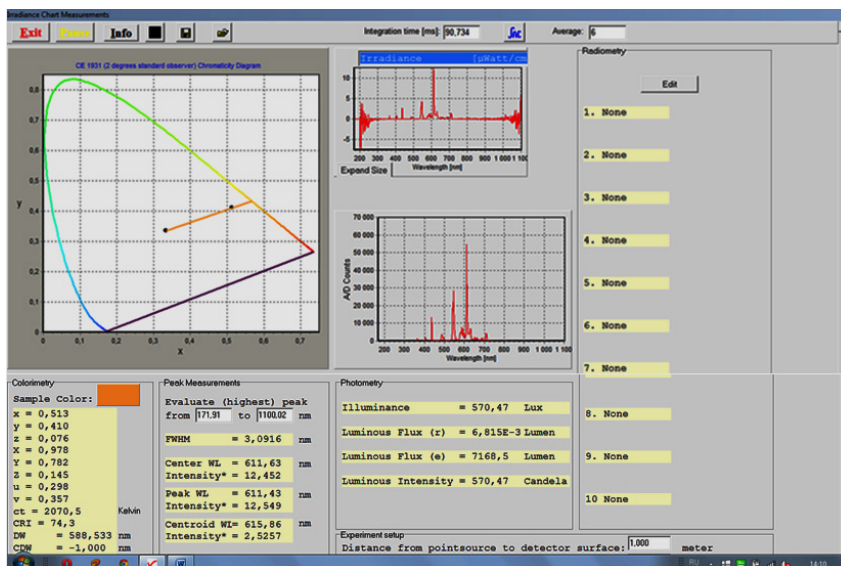


Рис. 4. Окно цветовой диаграммы для газоразрядного излучателя НД мощностью 18 Вт при напряжении 153 В в новом режиме: хроматические координаты, график поверхностной плотности потока излучения и график данных A/D счета, интегральные параметры

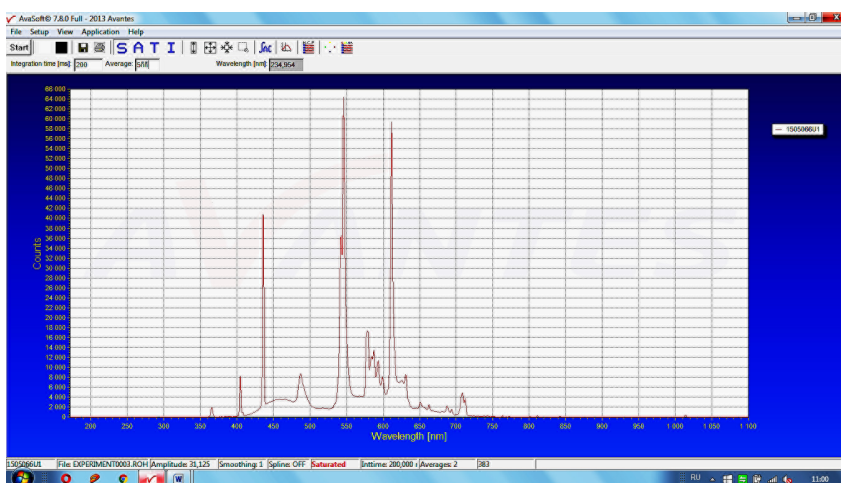


Рис. 5. Спектр газоразрядного излучателя НД 20 Вт в обычном режиме с питанием ТСФ. Напряжение питания 220 В

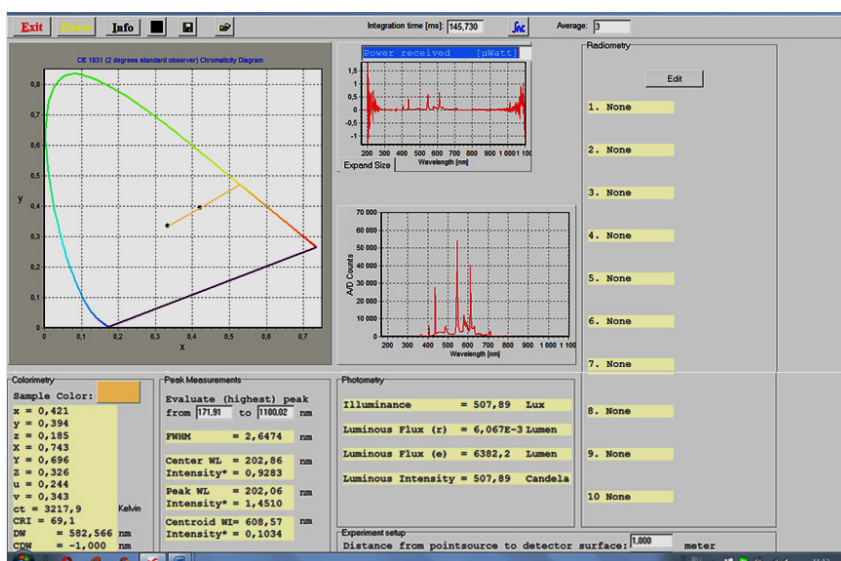


Рис. 6. Окно цветовой диаграммы для газоразрядного излучателя НД мощностью 20 Вт при напряжении 220 В в обычном режиме: хроматические координаты, график поверхностной плотности потока излучения и график данных A/D счета, интегральные параметры

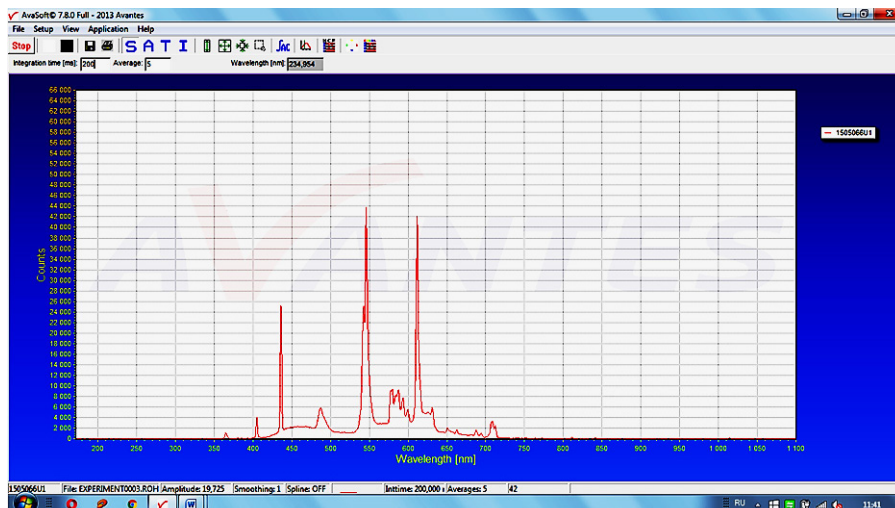


Рис. 7 Спектр газоразрядного излучателя НД 20 Вт в новом режиме с питанием ТСФ. Напряжение на излучателе 143 В

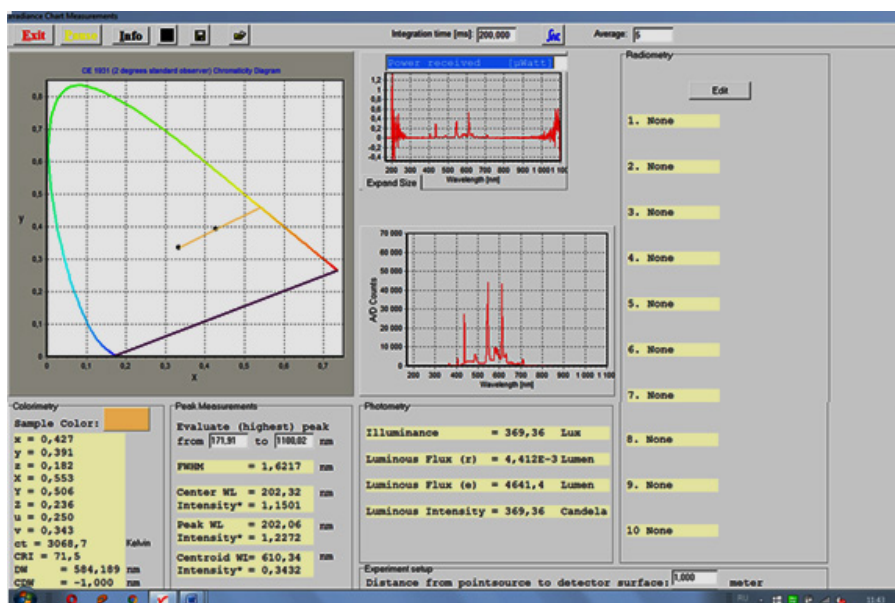


Рис. 8. Окно цветовой диаграммы для газоразрядного излучателя НД мощностью 20 Вт при напряжении 143 В в новом режиме: хроматические координаты, график поверхностной плотности потока излучения и график данных A/D счета, интегральные параметры

Экспериментально подтверждено, что для разрядных излучателей НД спектр излучения линейчатый: наиболее интенсивное излучение отмечено на длинах волн 430, 550 и 610 нм. Для исследуемого излучателя в спектре преобладает линия 610 нм. В новом режиме при питании излучателя ТСФ отмечены физические и технологические эффекты (рис. 3, 4): снижение напряжения на лампе: с 207,0 до 175,0 В, при практически неизменных значениях интегральных характеристик. Например, освещенность в сравниваемых режимах была равна: 664,2 лк в обычном режиме и 570,47 (675,0) лк в новом режиме. Интенсивность излучения в обычном режиме для указанных длин волн составила 800, 1900, 3700, а в новом режиме при напряжении 153 В — 750, 1550, 3100. В обычном режиме напряжение зажигания дуги / напряжение погасания дуги составило 166 В / 130 В, а в новом режиме соответственно — 120 В / 87 В, что свидетельствует о снижении составляющих падений напряжения на дуге. Отмечено также уменьшение коэффициента мощности

излучателя с 0,52 до 0,61, а также составляющих активной, реактивной и полной мощности.

**Вторая серия опытов.** Эксперименты выполнены для газоразрядного излучателя НД мощностью 20 Вт. На рис. 5 и 6 показаны спектры излучения и интегральные характеристики для обычного электрического режима, а на рис. 7 и 8, соответственно, для нового режима. Исследованиями подтверждено, что тип люминофора в газоразрядном излучателе НД влияет на интенсивность излучения линий 430, 550, 610 нм.

Для исследуемого излучателя наибольшая плотность потока излучения отмечена для линии 550 нм. При этом значение освещенности было равно 507,89 лк в обычном режиме. В новом режиме, при напряжении на излучателе равном 143 В, значение освещенности составило 369,6 лк.

Интенсивность излучения была равна 25000, 44000 и 42000 для указанных выше длин волн в спектре и наибольшее значение также соответствовало линии 550 нм.

**Выводы.** Повышение эффективности установок, работающих с использованием процессов ударной ионизации в электрическом разряде в газах и парах металлов, возможно за счет совершенствования электрического режима на основе применения ТСФ. При этом повышается подвижность заряженных частиц в газоразрядном промежутке, что обуславливает работу ЭТУ с более высокими значениями коэффициента мощности и КПД, за счет снижения приэлектродных падений напряжения в газоразрядном промежутке, что обуславливает снижение напряжения на излучателе, а также напряжения зажигания дуги / напряжения погасания дуги.

#### Библиографический список

1. Электротехнологические промышленные установки : учеб. для вузов / И. П. Евтюкова [и др.] ; под ред. А. Д. Свенчанского. — М. : Энергоиздат, 1982. — 400 с.
2. Птицына, Е. В. Работа дуговых печей небольшой емкости при питании током сложной формы / Е. В. Птицына, А. Б. Кувалдин // *Электротехнология*. — 2006. — № 6. — С. 26–36.
3. Птицына, Е. В. Электролизные и газоразрядные электротехнологические установки с питанием током сложной формы : моногр. / Е. В. Птицына ; под ред. А. Б. Кувалдина. — Павлодар : ТОО НПФ «ЭКО», 2007. — 420 с.
4. Птицына, Е. В. Анализ процессов в электротехнологических установках как основа разработки алгоритмов управления / Е. В. Птицына, Д. В. Птицын // *Электротехнология в первом десятилетии XXI века : сб. докл. науч.-техн. семинара, посвящ. 100-летию проф. М. Я. Смелянского*. — М., 2013. — С. 242–257.
5. Официальный сайт фирмы «Avantes». — Режим доступа : <http://www.avantes.ru/> — Загл. с экрана (дата обращения: 20.01.2016).

6. Птицына, Е. В. Экспериментальное определение влияния формы тока на характеристики излучателей / Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин // *Энерго- и ресурсосбережение XXI век : сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. интернет-конф., март–июнь*. — Орел, 2011. — С. 163–165.

7. Птицына, Е. В. Исследование процессов в инфракрасных излучателях при изменении значения и формы питающего напряжения / Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин // *Энерго- и ресурсосбережение XXI век : сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. интернет-конф., март–июнь*. — Орел, 2015. — С. 61–66.

**ПТИЦЫНА Елена Витальевна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Адрес для переписки: [evptitsyna@yandex.ru](mailto:evptitsyna@yandex.ru)

**ПТИЦЫН Дмитрий Вячеславович**, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ.

Адрес для переписки: [fdimon@ostu.ru](mailto:fdimon@ostu.ru)

**КУВАЛДИН Александр Борисович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», академик Российской академии электротехнических наук.

Адрес для переписки: [a.kuvaldin2013@yandex.ru](mailto:a.kuvaldin2013@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 18.02.16 г.

© Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин

## Книжная полка

**Зайченко, В. М. Автономные системы энергоснабжения / В. М. Зайченко, А. А. Чернявский. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2015. — 288 с. — ISBN 978-58365-0458-8.**

В книге изложены результаты исследований в области создания новых энергетических технологий на базе совместных разработок Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) и Научно-исследовательского и проектно-испытательского института «Ростовтеплоэлектропроект». Основное внимание авторами уделено ответственными разработкам, перспективам использования новых технических решений применительно к условиям нашей страны, при этом обзорные рассуждения существующего зарубежного опыта приведены только в тех случаях, когда это необходимо для понимания общих перспектив развития энергетики.

Книга может быть полезна инженерам и научным сотрудникам, студентам, аспирантам соответствующих специальностей.

621.314/К49

**Клименко, К. А. Исследование электромагнитного поля трансформаторов промышленной частоты с короткозамкнутыми витками : моногр. / К. А. Клименко. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 137 с.**

Приведены результаты исследований электромагнитного поля трансформаторов промышленной частоты с короткозамкнутыми витками, показана возможность использования трансформатора с короткозамкнутым кольцом в качестве датчика тока с разомкнутой сигнальной обмоткой, установлена возможность обнаружения наличия короткозамкнутых витков в силовых трансформаторах с использованием датчиков Холла, разработана методика расчета конструктивных параметров трансформаторного датчика тока с короткозамкнутым кольцом, позволяющая проектировать датчики для различных систем автоматики. Предназначена для специалистов в области электроэнергетики, а также для широкого круга научных работников, аспирантов и студентов вузов, обучающихся по энергетическим специальностям.

## ОСОБЕННОСТИ ВЕРИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ТЕЧЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ИВЗ

Целью данной работы является верификация математической модели расчета запыленного потока на примере циклона СЦН-40-640 для дальнейшего использования модели при расчете ИВЗ (инерционно-вакуумного золоуловителя). Важность разработки ИВЗ определяется требованиями, предъявляемыми европейскими стандартами по защите окружающей среды. Статья в примерах показывает и объясняет сложность выбора граничных условий. При необходимом совпадении результатов численных экспериментов и паспортных данных циклона верификация может считаться выполненной верно.

**Ключевые слова:** золоулавливание, инерционно-вакуумный золоуловитель, конструкция, верификация.

**Разработка аппарата ИВЗ выполняется по заданию фонда «Энергия без границ».**

Расчет установки, в которой движется дисперсный поток, является задачей непростой. Сложен он по ряду причин, главные из которых — построение сетки и выбор корректных граничных условий. Сетка не может быть в виде ячеек одинаковой величины, т.к. вблизи стенки необходим тонкий слой  $y^+$ , который может помочь рассчитать влияние пыли на стенки установки. Однако сильно малыми ячейки тоже быть не могут. Если ячейка меньше диаметра частицы, значит, велика вероятность, что эта частица не сможет пройти ряд ячеек и из-за этого расчет траектории полета частицы будет лишь до той ячейки, в которой она еще смогла поместиться. Некорректная сетка может видоизменить траектории полета частицы и сделать его неверным. Граничные условия так же не менее важные параметры, по которым можно оценивать качество расчета установки.

Граничные условия, которые мы будем верифицировать относительно движения потока в циклоне, предложены в табл. 1.

Выбор любой из этих пар несет свои преимущества и недостатки касательно дальнейшего их использования при расчете нового золоуловителя. В результате экспериментов, проведенных с помощью вычислительного модуля ANSYS CFX, будет видно, какие граничные условия наиболее корректно использовать для расчета принципиально нового золоуловителя.

Численный анализ проводился в оболочке ANSYS CFX [1]. При проведении расчетов была выбрана  $k-\varepsilon$  модель турбулентности.

При описании процесса течения использовались классические уравнения гидродинамики:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0;$$

уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_z \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_z \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_z \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_z \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \omega}{\partial z} = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_z \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_z \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial \omega}{\partial z} \right); \end{aligned}$$

уравнения  $k-\varepsilon$  модели:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial}{\partial x} (k) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (k) + \rho w \frac{\partial}{\partial z} (k) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_t \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_t \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t D - \rho \varepsilon, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon) + \rho w \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \\ + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} D - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \end{aligned}$$

Верифицируемые граничные условия

Вход	Выход
Массовый расход потока уходящих газов	Давление
Давление	Давление
Массовый расход потока уходящих газов	Скорость потока газов

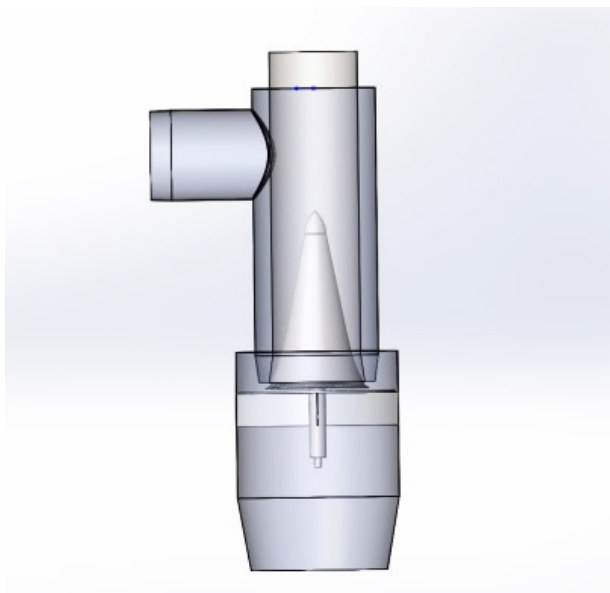


Рис. 1. ИВЗ

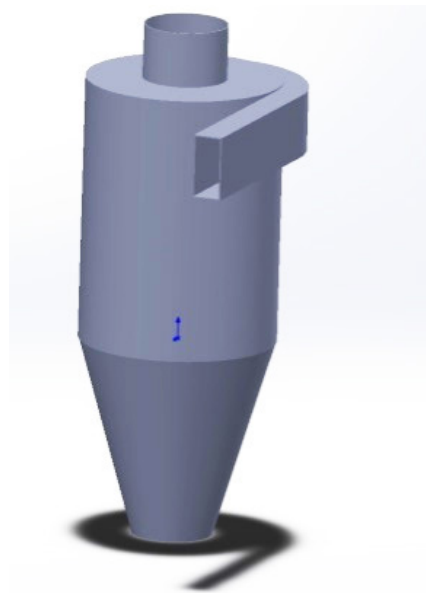


Рис. 2. СЦН-40-640

уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

$$\mu_{\varepsilon} = \mu + \mu_i, \mu_i = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

В численном эксперименте использовалось уравнение, которым описывается движение частиц. Влияние частиц на поток будет минимальным из условия, что поток является слабозапыленным (70 мг/м<sup>3</sup> на 150000 м<sup>3</sup>/ч расхода уходящих газов в ИВЗ [2], и 70 мг/м<sup>3</sup> на 50000 м<sup>3</sup>/ч для СЦН-40). Силы, действующие на частицу, описаны ниже.

Уравнение движения частицы было получено Бассетом, Буссинеском и Озееном:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_{BA}.$$

Физический смысл сил, находящихся по правую сторону уравнения:

$F_D$  — сила сопротивления, действующая на частицу.

$F_B$  — выталкивающая сила земного притяжения.

$F_R$  — силы, возникающие за счет вращения потока (центробежная и сила Кориолиса).

$F_{VM}$  — виртуальная (или добавочная) массовая сила. Это усилие, необходимое для того, чтобы ускорить виртуальную массу жидкости в объеме, занимаемом частицами. Этот термин имеет важное значение в случае, когда смещенная масса жидкости превышает массу частиц, например, в движе-

нии пузырьков. В данном случае равна нулю.

$F_{BA}$  — сила Бассета или расчет той ее части, на долю которой приходится отклонение в структуре потока от стационарного состояния. Этот термин не применяется в CFX. Равна нулю в данном расчете [3–6].

Подтверждение результатов инерционно-вакуумного золоуловителя ИВЗ (рис. 1) будет на циклоне СЦН-40-640 (рис. 2). Золоулавливающие установки изображены в программном модуле Solidworks.

Для того чтобы начинать делать выводы по разным циклонам, разберем паспортные данные каждого.

СЦН-40 — это высокоэффективный циклон, изготавливаемый как в одиночном, так и в групповом исполнении. Предназначен для утилизации средне- и мелкодисперсной пыли в технологических газах и аспирационных выбросах. Такой показатель, как размер частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %, у циклона СЦН-40 самый лучший из всех циклонов НИИОГАЗ и составляет 1,0 мкм.

Циклоны группового исполнения изготавливаются как с «левым» так и с «правым» вращением газового потока. Оптимальная скорость на входе в циклон 16,5–24 м/с, при этом сопротивление циклона 1125–2300 Па.

Скорость 16,5 м/с в проточной части корпуса циклона рекомендуется для очистки от абразивной пыли, согласно паспортным данным.

В численных экспериментах с граничными условиями: давление — давление получается 100 % очистка газа от пыли. Максимальная скорость, достигаемая



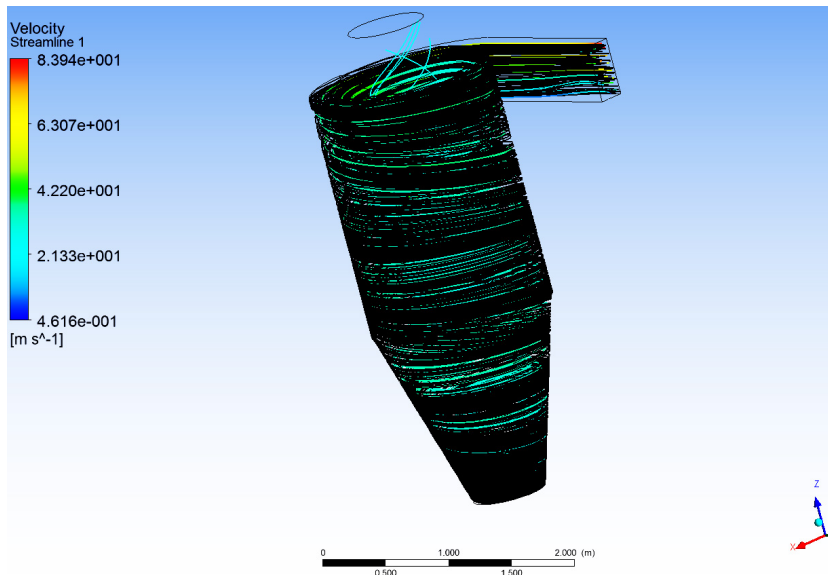


Рис. 3. Расчет СЦН-40-640 с граничными условиями: давление на входе, давление на выходе

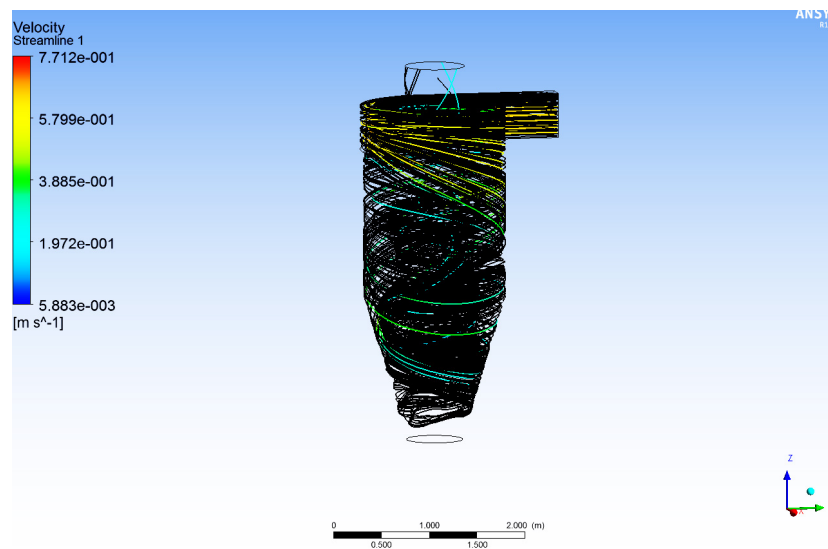


Рис. 4. Расчет СЦН-40-640 с граничными условиями: расход на входе, давление на входе

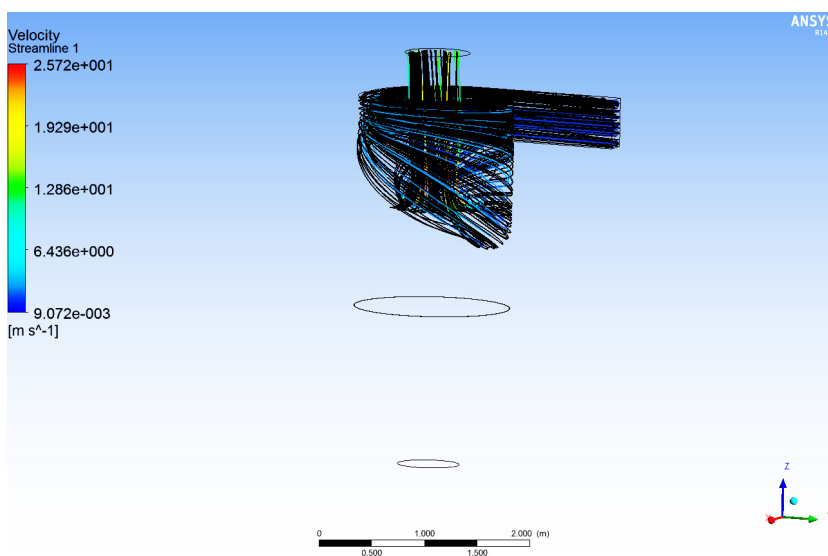


Рис. 5. Расчет СЦН-40-640 с граничными условиями: давление на входе, скорость на входе

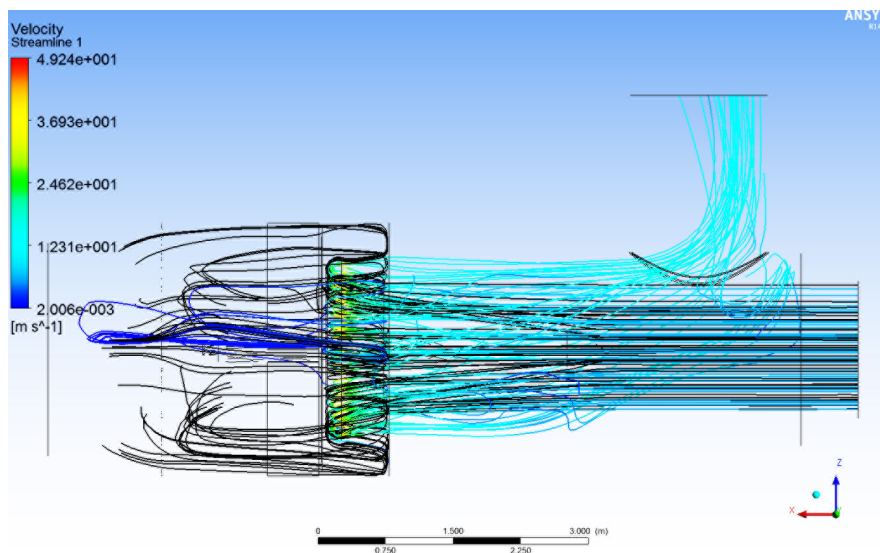


Рис. 6. ИВЗ с граничными условиями: давление на входе, давление на выходе

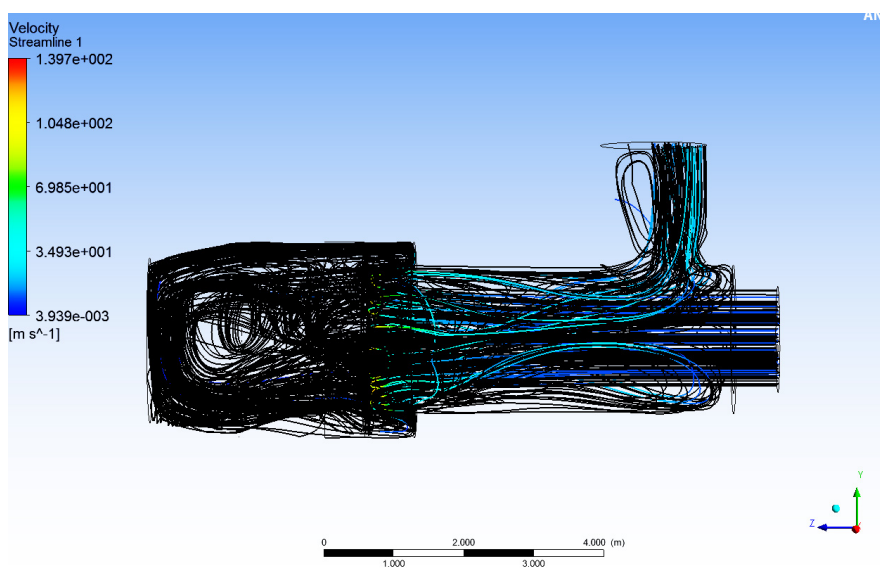


Рис. 7. ИВЗ с граничными условиями: расход на входе, скорость на выходе

в корпусе — 83 м/с, рабочий перепад был в интервале 99875 Па — 99288 Па. Хотя изначально граничные условия были выставлены: давление — 100000 Па на входе и давление — 99265 Па на выходе (рис. 3). Мы не контролировали расход потока в установке, программа сама смоделировала, что на входе 7,506 кг/с, на выходе 7,482 кг/с, учитывая, что расход частиц мы задавали (0,011 кг/с — это составляет 10 % от массы потока в 0,11 кг/с, из которых изначально и велся расчет).

В численных экспериментах с граничными условиями: расход 0,11 кг/с — давление 100000 Па. Массовый расход 0,11 — 0,110067 кг/с среднее давление 99993 Па — 100000 Па. Скорость максимальная 0,7 м/с. При заданных 0,11 кг/с — 100000 Па. (0,011 кг/с — это составляет 10 % от массы потока в 0,11 кг/с, из которых изначально и велся расчет (рис. 4)).

Максимальная скорость — 25 м/с; расход на входе 0,11 — на выходе 4,2 кг/с; перепад: 1,92 Па — 174 Па. При заданных граничных условиях, расход — 0,11 кг/с на входе скорость потока — 15 м/с на выход (0,011 кг/с — это составляет 10 %

от массы потока в 0,11 кг/с, из которых изначально и велся расчет) (рис. 5).

Далее рассматривается установка ИВЗ. Паспортных данных на нее не имеется, однако был проведен эксперимент на малой модели, 2 метра высотой, на основании которого можно судить, с точки зрения физики, о движении потока внутри проточной части аппарата. Степень газоочистки составляет около 99 %.

Граничные условия: давление на входе 100000 Па — давление на выходе 99344 Па. 99 % — степень улавливания (2,91 кг/с — это составляет 7 % от массы потока в 33,25 кг/с, из которых изначально и велся расчет). Особенность постановки граничных условий в том, что при иной компоновке деталей подъем и опускание входного патрубка, перемещение рассекателя и т.п. наблюдается ухудшение показателей улавливаемости, чего не наблюдалось на циклоне СЦН-40 — 640 (рис. 6).

33,25 кг/с — 33,1494 кг/с, 113327 Па — 99999,8 Па. Граничными условиями является расход 33,25 кг/с — расход на выходе 100000 Па. Максимальная скорость 139 м/с (рис. 7).

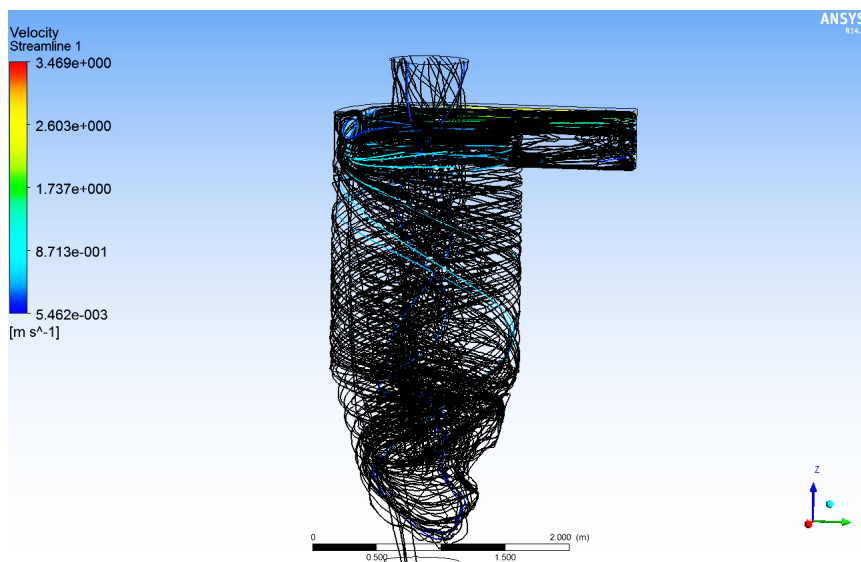


Рис. 8. Верификация СЦН-40-640

Сложность расчета новой установки состоит в том, что для верификации по паспортным данным циклонов используются разные граничные условия. Как, например, для СЦН:

— граничные условия: общее давление — 100000 Па на входе, 0,2829 кг/с расход потока газов с пылью на выходе, с опорным давлением на 98290 Па, с учетом кинетической энергии  $1 \text{ м}^2\text{с}^2$  и турбулентно-вихревой диссипации  $0,0001 \text{ м}^2\text{с}^3$ , распределение пыли по параметрам экибастузской золы (рис. 8).

В результате численных экспериментов с различными граничными условиями, с точки зрения физики, реализуется три различных граничных условия, что связано с различной сложностью конфигурации проточной части аппарата. Результаты этих расчетов показывают, что под каждый золоуловитель необходимо выбирать свои граничные условия, при которых установка сможет работать и выдавать результаты своих паспортных данных. В ходе численных экспериментов было выявлено, что для ИВЗ граничные условия должны быть (давление — давление), для СЦН-40-640 (давление — расход).

В конечном итоге граничные условия необходимо выставлять на основании проведения испытаний.

#### Библиографический список

1. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство / Под ред. А. К. Любимова. — Н. Новгород : Изд-во Нижегородского ун-та, 2006. — 227 с.

2. Пат. 93298 Российская Федерация, МПК7 В 01 D 45/06. Инерционно-вакуумный пылеуловитель / Белоглазов В. П., Ченцов А. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Вихрь». —

№ 2009144229/22 ; заявл. 30.11.09 ; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12. — 6 с.

3. Влияние скорости дисперсного потока в конфузном сечении инерционно-вакуумного пылеуловителя на степень улавливания частиц // Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10 июня / В. П. Белоглазов, М. В. Комаров, А. С. Мозжогов, А. А. Петрищев, И. В. Рафальский ; под ред. : В. В. Шалая, А. С. Ненишева, А. Г. Михайлова, Т. В. Новиковой. — Омск : ОмГТУ, 2011. — С. 92–95.

4. Белоглазов, В. П. Влияние входной скорости в инерционно-вакуумном золоуловителе на степень улавливания золы экибастузского угля / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 3 (133). — С. 183–197.

5. Lesieur, M. Turbulence in Fluids. Fluid Mechanics and Its Applications. — 3rd edition. — Kluwer Academic Publishers, 1997. — 288 p.

6. George R. Sell, CiprianFoias. Turbulence in Fluid Flows: A Dynamical Systems Approach / George R. Sell, CiprianFoias, Roger Temam. — Springer Science & Business Media, 1993. — 197 p.

**БЕЛОГЛАЗОВ Владимир Петрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vrbn@mail.ru

**БЕЛОГЛАЗОВА Любовь Владимировна**, аспирантка, ассистент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: teploblv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.16 г.

© В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова

## ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Данная статья посвящена описанию методики насыщения углеродом медных пластин коллектора тягового электродвигателя методом химико-термической обработки при помощи теплового пистолета для повышения его эксплуатационных характеристик.

**Ключевые слова:** тяговой электродвигатель, коллекторно-щеточный узел, термообработка, химико-термический метод, упрочнение, износостойкость.

В последние годы наблюдался устойчивый рост объемов перевозок темпами, большими, чем прогнозировалось. Растущие перевозки требовали обеспечения надежным парком локомотивов. Между тем имеющийся инвентарный парк ОАО «РЖД» сегодня изношен более 73 %, особенно пассажирские электровозы постоянного тока. В настоящий момент все локомотивы ЧС2 выработали нормативный срок службы, однако их эксплуатация продолжается после соответствующих видов технических обслуживаний и ремонтов.

Тяговые электрические двигатели (ТЭД) локомотивов работают в тяжелых климатических условиях: большой перепад температур и атмосферного давления, повышенная влажность и запыленность воздуха. В процессе эксплуатации идет интенсивное воздействие на поверхность коллектора, в результате чего происходит его износ, который имеет неравномерный характер; увеличивается шероховатость.

Дефекты коллектора, возникающие в эксплуатации, имеют две основные причины возникновения: механическую и электрическую, которые тесно связаны между собой.

Проблема повышения эксплуатационных свойств деталей электрических машин постоянного тока (ЭМПТ), инструментов, приборов методами поверхностного легирования и упрочнения приобретает все большую актуальность. Одним из наиболее перспективных методов упрочнения поверхностей коллекторных пластин ТЭД является объемное и поверхностное изменение структуры и свойств термообработкой [1]. При ремонте коллектора (рис. 1а) необходимо стремиться получать значение шероховатости поверхности коллектора не ниже  $R_a = 3,2$  мкм.

В существующем технологическом процессе это достигается шлифованием и полированием коллектора абразивными материалами. Абразивная обработка рабочей поверхности коллектора якоря ТЭД ТЛ-2К1 (рис. 1б) отрицательно сказывается на работе КЩУ [2, 3].

Для того чтобы обеспечить стабильную передачу тока от щетки к коллектору, безыскровую работу коллекторно-щеточного узла и сократить время на приработку электрической машины после очередного технического обслуживания или ремонта в объеме ТР-3, предлагается использовать метод создания окисной углеродосодержащей пленки на поверхности коллектора для применения в технологических процессах изготовления и ремонта тяговых электродвигателей.

При этом, чтобы учесть специфику технологического процесса ремонта ТЭД и его конструктивные особенности, необходимо реализовать следующий порядок выполнения технологических операций, пренебрегая операциями сборки и разборки: 1) обработка коллектора на специализированном токарном станке; 2) продорозка коллекторных пластин; 3) отделочные операции; 4) формированием адсорбционного слоя, содержащего атомы углерода, на коллекторе ТЭД.

Суть инновационной технологии заключается в создании адсорбционного слоя (окисного слоя) на медной пластине коллектора тягового электродвигателя, что позволит сократить время на приработку электрических машин постоянного тока, по свойствам аналогичного материалу электрографитной щетки марки ЭГ-74 (графитом). Химико-термический метод (ХТМ) обработки несколько изменяет физико-химические свойства адсорбционных слоев: повышает износостойкость при трении и стойкость к различным видам коррозии, снижает переходное сопротивление и улучшает коммутационные характеристики коллекторно-щеточного узла [4].

Известно, что температура плавления меди составляет  $1084^{\circ}\text{C}$  и непосредственное создание адсорбционного слоя на рабочей поверхности медных пластин всего коллектора тягового электродвигателя в печи при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  невозможно, т.к. у коллекторного изоляционного материала максимальная допустимая рабочая температура составляет  $180 - 200^{\circ}\text{C}$ , что приведет к его расплавлению

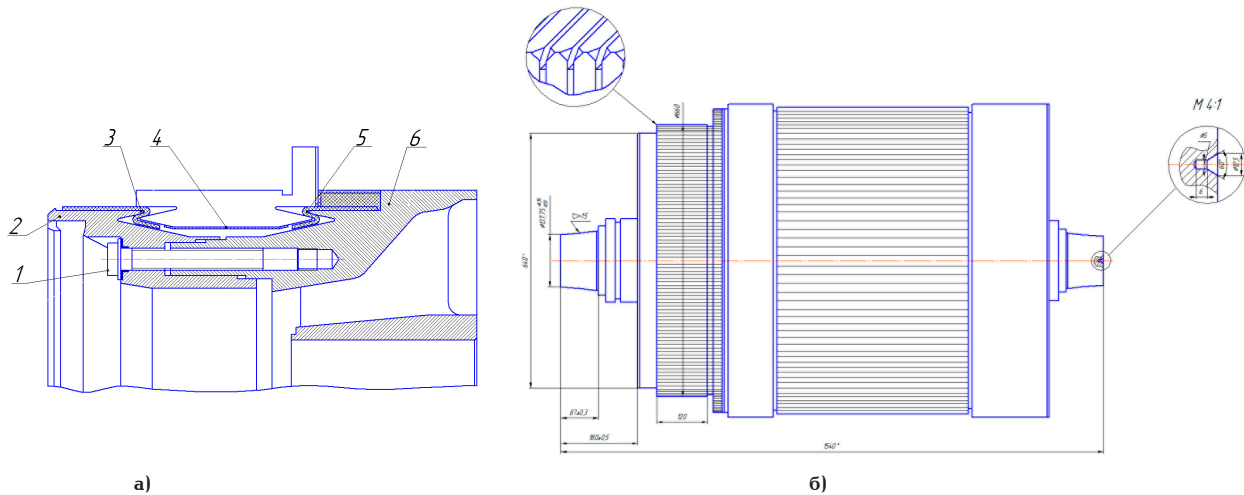


Рис. 1. Коллектор (а) и якорь (б) тягового электродвигателя ТЛ-2К1:  
1 — стяжные болты; 2 — нажимной конус; 3 — коллекторные пластины;  
4 — цилиндр; 5 — миканитовые манжеты; 6 — нажимная шайба

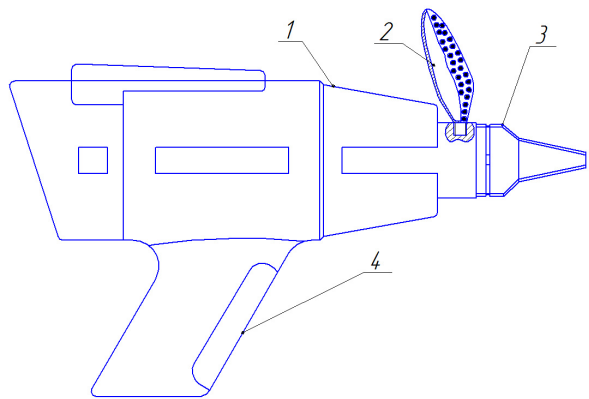


Рис. 2. Тепловой пистолет GTV16:  
1 — тепловой пистолет; 2 — резервуар для хранения графитового порошка; 3 — специализированная насадка;  
4 — рукоятка

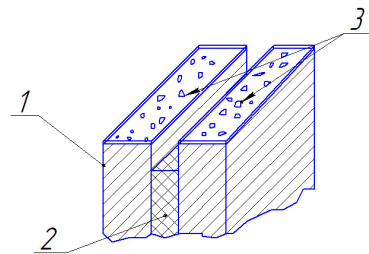


Рис. 4. Композиционная структура контактного элемента тягового электродвигателя  
1 — медная пластина; 2 — изоляционный материал (миканит); 3 — внедренные зерна графита

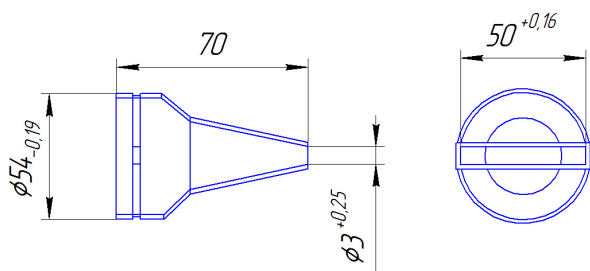


Рис. 3. Специализированная насадка для локального нагрева медной пластины коллектора тягового электродвигателя ТЛ-2К1

и потере всей изоляции в коллекторной электрической машине.

В связи с этим предлагается для получения адсорбционного углеродсодержащего слоя на рабочей поверхности медных пластин коллектора тяговых электродвигателей использовать тепловой пистолет GTV16 со специально спроектированной насадкой (рис. 2).

Тепловой пистолет 1 позволит осуществлять местные локальные нагревы медной пластины кол-

лектора на глубину не более 1,2 мм и ширину 4 мм с помощью специальной спроектированной насадки 3 из жаропрочной высоколегированной стали марки 20Х25Н20С2. При нагреве медной пластины коллектора до определенной температуры из резервуара 2 подается графитный порошок, а затем через насадку попадает на поверхность обрабатываемой детали и оседает в виде паров. В результате, перемещая насадку теплового пистолета с помощью рукоятки 4, создается окисная пленка на коллекторных пластинах ТЭД. Конструкция специальной спроектированной насадки представлена на рис. 3.

Размягчение наружного слоя меди даёт возможность осуществлять насыщение атомами углерода адсорбционного слоя рабочей поверхности без повреждения изоляции тягового электродвигателя (коллекторного миканита). При нагреве меди на данную глубину, учитывая теплопроводность меди, возможность повреждения изоляции ТЭД отсутствует. В качестве измерительного прибора для контроля температурных изменений рекомендуется использовать дистанционные измерители температур — инфракрасный термометр LaserSight, который обеспечивает профессиональное неконтактное измерение температуры объектов размером от 1 мм в широком диапазоне температуры от  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+900^{\circ}\text{C}$ .

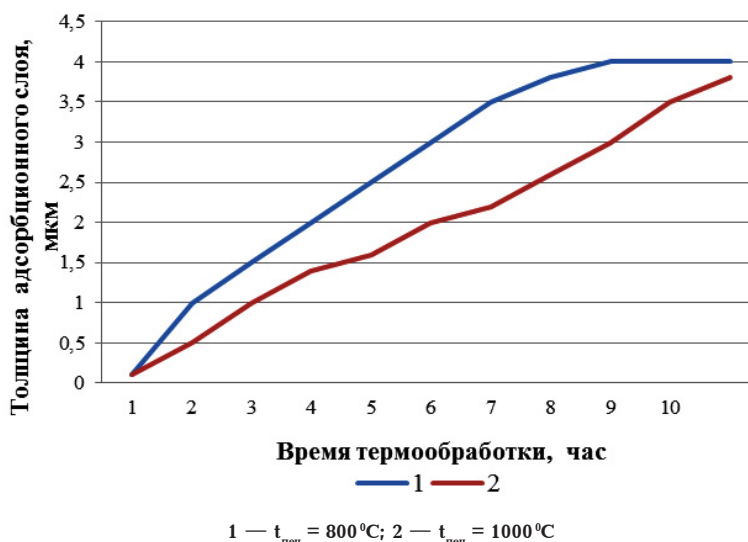


Рис. 5. Зависимость толщины адсорбционного слоя от времени нагрева медной пластины с углеродистым покрытием

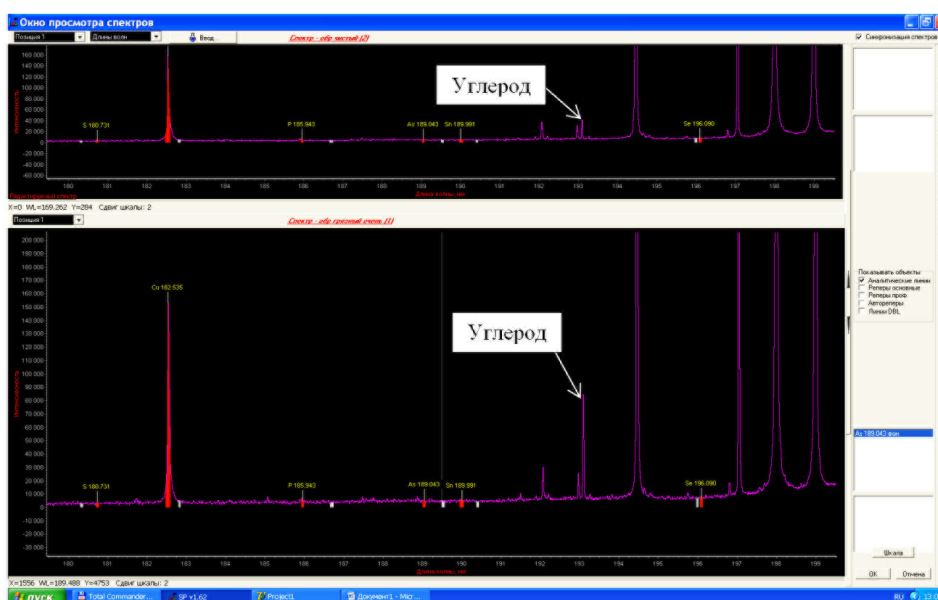


Рис. 6. Сравнение спектров чистого и подвергнутого химико-термическому методу обработки образцов (C 193,090 нм)

После создания окисной пленки поверхностный слой должен приобрести гетерогенную структуру с небольшими включениями, что является признаком завершения процесса адсорбции. В результате на медной поверхности коллекторной пластины тягового электродвигателя ТЛ-2К1 формируется адсорбционный слой (рис. 4). Благодаря данному методу создания адсорбционного слоя на поверхности медных коллекторных пластин значительно уменьшается время приработки ТЭД за счет быстрого образования политуры, следовательно, улучшаются коммутационные свойства тягового электродвигателя.

Для определения толщины адсорбционного слоя в процессе термообработки предлагается использовать методику, за основу которой принято уравнение 1:

$$h_D^2 = K(t) \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $h_A$  — толщина адсорбционного слоя;  $K(t)$  — па-

раметр, пропорциональный коэффициенту адсорбции (зависит от температуры);  $\tau$  — время образования адсорбционного слоя толщиной  $h_A$ .

В результате дифференцирования уравнения получили выражение 2:

$$\Delta h_D^2 = \frac{K(t) \cdot \Delta \tau}{2 \cdot h_D}, \quad (2)$$

где  $h_A$  — толщина адсорбционного слоя, образующаяся за время  $\Delta \tau$ .

Толщина адсорбционного слоя в  $i-1$  и  $i$  в  $t$  момент времени определяется по формуле 3:

$$h_{Di} = h_{Di-1} + \Delta h_{Di-1}, \quad (3)$$

где  $h_{Ai-1}$ ,  $\Delta h_{Ai-1}$  — толщина адсорбционного слоя в  $i-1$  и  $i$  моменты времени, соответственно  $h_{Ai-1}$ .

Данные расчеты проводятся непосредственно с измерительными данными после эксперимен-

тального опыта. На рис. 5 представлен график, иллюстрирующий зависимость времени обработки и толщины получаемого адсорбционного слоя.

В результате эксперимента был получен адсорбционный слой на медной пластине коллектора ТЭД ТЛ-2К1 определенной толщины, порядка 4 мкм.

Для подтверждения результатов насыщения поверхности атомами углерода проведен атомно-эмиссионный спектральный анализ с использованием стандартных образцов сравнения. Тип прибора — «Аргон — 5СФ».

Окно программы спектрометра со спектрами исходного (чистого) и науглероженного приведены на рис. 6.

На спектрограммах отмечены спектральные линии основы — меди (спектральная линия  $\text{Cu}$  182,535 нм) и углерода  $\text{C}$  193,090 нм. Анализ сравнения спектров чистого и поверхности подвергнутой обработки экспериментальным тепловым пистолетом образцов показал, что в образце с адсорбционным слоем интенсивность выше в 2 раза, что соответствует массовой доле углерода ( $\text{C}_c$ ) около 0,085 %.

Таким образом, при создании окисной пленки поверхности медных пластин коллектора тягового электродвигателя приобрела с измененными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, что непосредственно влияет на стадию приработки коллекторно-щеточного узла, сокращает ее длительность, что позволит оптимизировать процессы производства и ремонта ТЭД.

#### Библиографический список

1. Белан, Д. Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей / Д. Ю. Белан, А. А. Ражковский // Известия Транссиба. — 2012. — № 2 (4). — С. 14–18.
2. Авилов, В. Д. К вопросу о повышении коммутационной устойчивости коллекторных электрических машин постоянного тока / В. Д. Авилов, П. Г. Петров, Е. М. Моисеенок // Известия Транссиба. — 2010. — № 2 (2). — С. 2–6.
3. Авилов, В. Д. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов // Известия Транссиба. — 2012. — № 2 (10). — С. 2–7.
4. Белан, Д. Ю. Повышение эксплуатационных характеристик электрических машин методом химико-термической обработки / Д. Ю. Белан, А. А. Ражковский // Известия Транссиба. — 2012. — № 2 (4). — С. 14–18.

**БЕЛАН Дмитрий Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

Адрес для переписки: baltazar.13@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.12.2015 г.

© Д. Ю. Белан

УДК 621.3.05:519.65

**Д. А. ЕЛИЗАРОВ**

Омский государственный университет путей сообщения

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**В статье приводится анализ методов оценки гармонических составляющих напряжения при натурном эксперименте. Точность полученных результатов быстрым методом корреляционных функций сопоставима с модернизированным методом корреляционных функций.**

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, спектральный анализ сигнала, гармонические составляющие, метод корреляционных функций.

Повышение качества электроэнергии (КЭ) является основным фактором повышения энергетической эффективности промышленных предприятий. Введение новых стандартов в области КЭ повлекло за собой изменение требований к составу показателей КЭ, точности их измерений, характеристикам средств измерений [1–2].

Одними из важных показателей КЭ, являются показатели, характеризующие несинусоидальность напряжения: коэффициенты гармонических составляющих напряжения и суммарный коэффи-

циент гармонических составляющих напряжения. Для анализа несинусоидальности режимов напряжения разлагаются на гармонические составляющие.

Высокую точность оценки гармонических составляющих напряжения может обеспечить цифровая обработка сигналов, в этом случае его математической основой является быстрое преобразование Фурье (БПФ) [3–4]. Применение дополнительных методов для определения гармонических составляющих напряжения обусловлено неспособностью

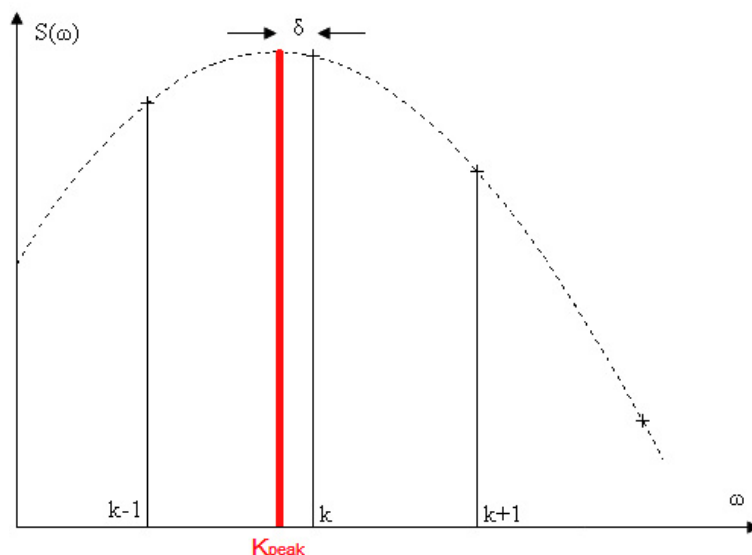


Рис. 1. Случай несовпадения максимума БПФ и спектра напряжения

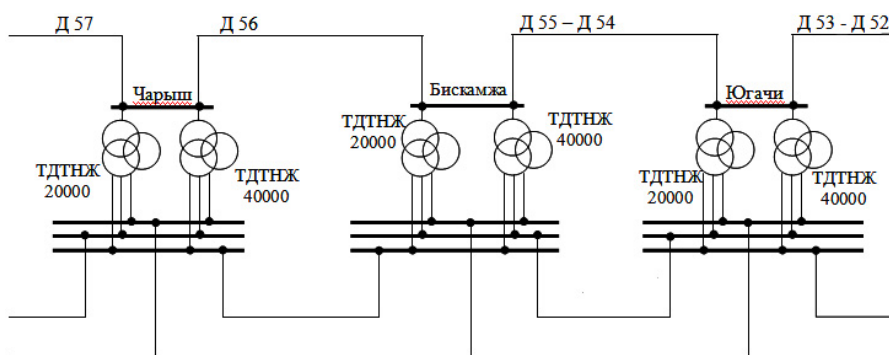


Рис. 2. Схема внешнего электроснабжения участка Чарыш–Югачи Абаканской дистанции электроснабжения

БПФ точно определить частоту, когда максимум БПФ не совпадает со спектром сигнала (рис. 1) [5–7]. На рис. 1 номера отсчетов максимума БПФ и его двух соседних вершин обозначены как  $k$ ,  $k+1$  и  $k-1$  соответственно. Порядковый номер максимальной гармоники спектра напряжения обозначен как  $k_{peak}$ . Разность между  $k_{peak}$  и  $k$  обозначена как  $\delta$ .

В качестве дополнительного метода лучше использовать разработанный автором быстрый метод корреляционных функций [8–10]. Базовым параметром быстрого метода корреляционных функций является коэффициент корреляции. Для исследуемой функции напряжения формируется набор эталонов. Далее производится анализ на наличие связи в точках между параметрами исследуемого напряжения и эталона. Наибольшее значение коэффициента корреляции показывает на эталон, параметр которого необходимо выбрать. Расчет коэффициента корреляции производится по пяти точкам, так как для дискретного спектра энергия гармоники (порядка 80 %) сосредоточена в ближайших 3–5 отсчетах в районе максимума амплитудного спектра. Амплитуда  $v$ -й гармоники измеряемого напряжения определяется по следующей формуле:

$$A_v = \frac{1}{E} \cdot \sqrt{\left( \sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Re}(U_i) \cdot W_{ji} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Im}(U_i) \cdot W_{ji} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $E$  — сумма квадратов значений  $W_{ji}$ ;

$W_{ji} = \{W_{j0}, W_{j1}, \dots, W_{jM}\}$  — набор эталонных множеств из  $M$  точек (в нашем случае  $M=5$ );

$Y = \{Y_0, Y_1, \dots, Y_M\}$  — реализация ДПФ периодического сигнала, состоящая из  $M$  точек, ограниченного окном.

Значение наибольшей амплитуды гармоники соответствует коэффициенту корреляции. Максимальное значение корреляционной функции определяется согласно алгоритму Фибоначчи. Наибольшее значение модуля амплитуды гармоники показывает на пару эталон-сигнал и, соответственно, на величину отклонения  $\delta$  от базовой точки  $B$ . Частота гармоник напряжения определяются как сумма значений  $B$  и  $\delta$ .

В статье приведен анализ полученных результатов оценки гармонических составляющих напряжения разработанным быстрым методом корреляционных функций при проведении эксперимента на объекте исследования.

Объектом исследования является тяговая подстанция Бискамжа и межподстанционных зонах Югачи–Бискамжа (Абаканской дистанции электроснабжения Красноярской железной дороги). Оценка гармонических составляющих напряжения производилась при нормальном режиме работы энергосистемы и при двустороннем питании межподстанционных зон. Схема внешнего электроснабжения участка Чарыш–Югачи приведена на рис. 2.



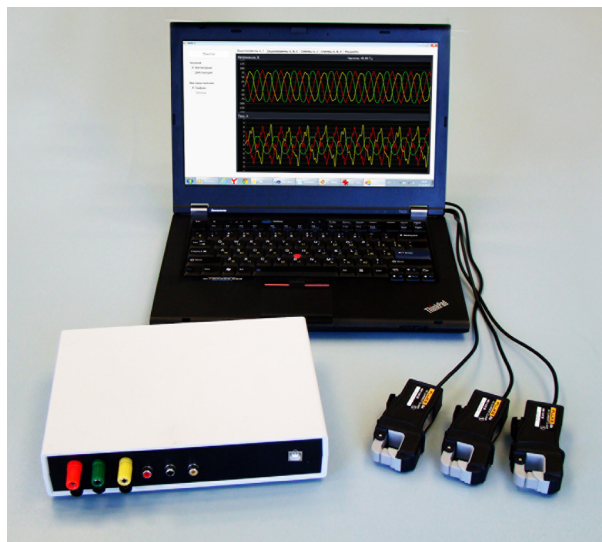


Рис. 3. Многофункциональный измерительный комплекс: токовые клещи, измерительный модуль, переносной компьютер

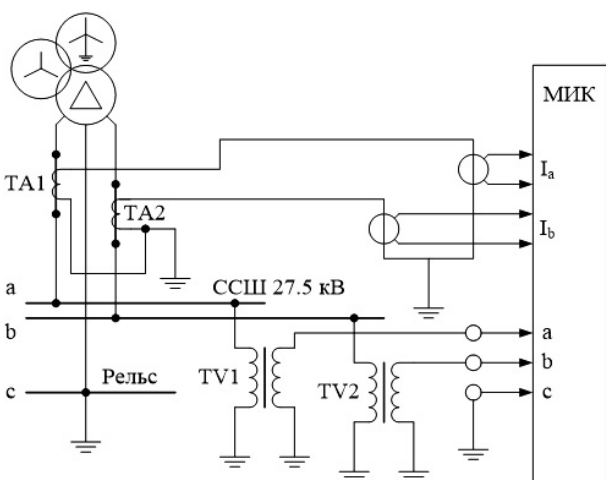


Рис. 4. Схема подключения МИК к сети

Для получения дискретных значений был использован многофункциональный измерительный комплекс (МИК) [11 – 12]. Внешний вид МИК приведен на рис. 3. Схема подключения измерительного устройства к сети представлена на рис. 4. Обмотки измерительного трансформатора соединены по схеме «треугольник» с заземленной фазой с. На МИК подаются потенциалы фаз a, b, заземленной фазы с и линейные токи с двух измерительных трансформаторов тока. Такая схема подключения позволяет получить в качестве первичной информации мгновенные линейные напряжения и мгновенные линейные токи.

Полученная при помощи МИК выборка исследуемого напряжения была обработана в среде пакета Matlab. Для исследуемого сигнала были определены гармонические составляющие напряжения модернизированным методом корреляционных функций, методом, рекомендованным в ГОСТ 30804.4.7-2013 (метод по ГОСТу), и быстрым методом корреляционных функций.

На рис. 5 представлены графики напряжения на фидере контактной сети (ФКС), которые получились в результате восстановления исследуемого

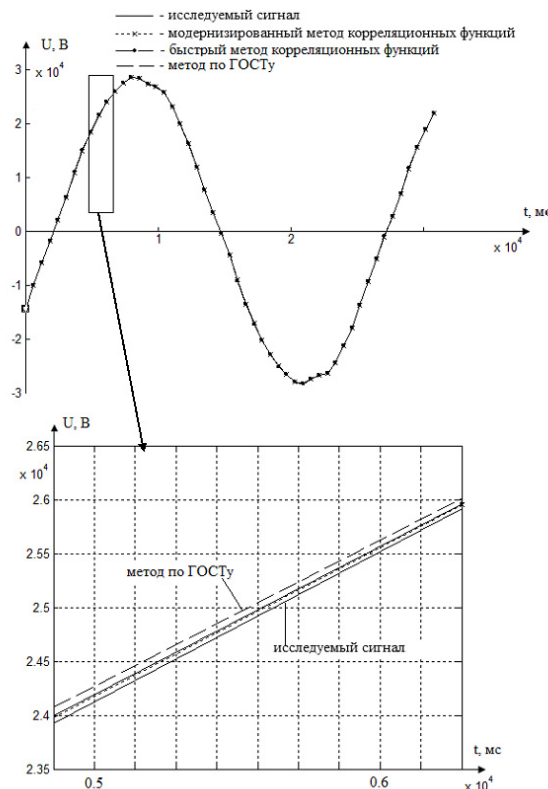


Рис. 5. Напряжения на фидере контактной сети при двустороннем питании участка Югачи–Бискамажа

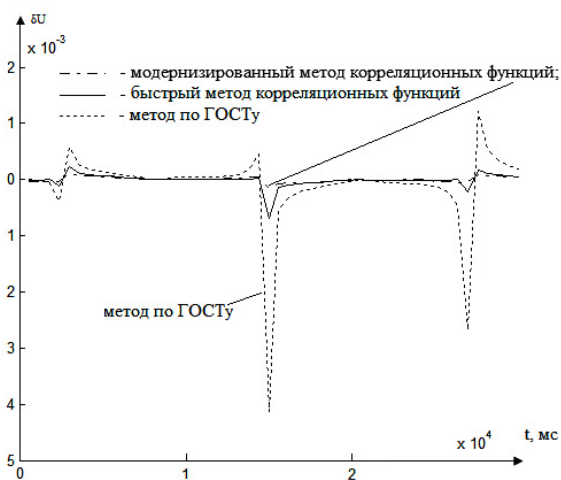


Рис. 6. Относительная погрешность результатов вычисления

го сигнала при помощи рассматриваемых методов спектрального анализа и сам исследуемый сигнал. На рис. 6 представлены графики зависимости относительной погрешности результатов вычисления, полученных различными методами. Для исследуемой кривой напряжения на ФКС были определены коэффициенты гармонических составляющих. Результаты представлены на рис. 7.

На рис. 5–7 видно, что точность быстрого метода корреляционных функций сопоставима с точностью модернизированного метода корреляционных функций. Величина отклонения не превышает 0,5 процента.

На основе представленных в статье материалов можно сделать следующие **выводы**:

1) точность полученных результатов быстрым методом корреляционных функций сопоставима

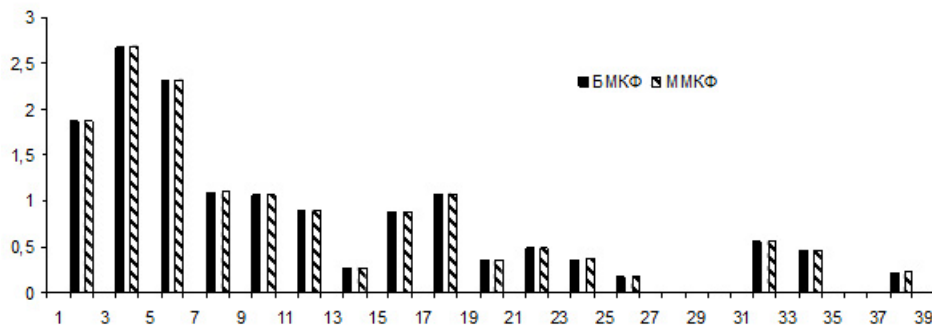


Рис. 7. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения на ФКС при двустороннем питании участка Югачи–Бискамажа (БМКФ — быстрый метод корреляционных функций, ММКФ — модернизированный метод корреляционных функций)

с модернизированным методом корреляционных функций. При этом было выявлено, что величина отклонения восстановленного напряжения быстрым методом корреляционных функций не превышает 0,5 процента отклонения восстановленного сигнала методом корреляционных функций;

2) величина среднеквадратичного отклонения быстрого метода корреляционных функций сопоставима с модернизированным методом корреляционных функций;

3) доказана воспроизводимость результатов оценки гармонических составляющих напряжения быстрым методом корреляционных функций.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014–07–01. — Режим доступа : <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=184246> (дата обращения: 31.01.2016).

2. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. — Введ. 2014–01–01. — Режим доступа : <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=183990>. (дата обращения: 31.01.2016).

3. Альтман, Е. А. Совершенствование метода корреляционных функций / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве : тр. Всерос. конф. — Воронеж, 2011. С. 76–77.

4. Чижма, С. Н. Метод спектрального анализа сигналов в системах электроснабжения / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — 1 (117). — С. 198–201.

5. Альтман, Е. А. Исследование методов определения параметров однотонального сигнала тяговой электрической сети / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров // Известия Транссиба. — 2010. — № 4 (4). — С. 103–111.

6. Чижма, С. Н. Анализ точности метода спектрального анализа сигналов в системах электроснабжения / С. Н. Чижма, Р. И. Газизов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — 1 (117). — С. 202–206.

7. Kay S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory / S. M. Kay. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993, 559 p.

8. Альтман, Е. А. Совершенствование алгоритма определения параметров гармоник сигналов в электрической сети для оценки качества электроэнергии / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, С. Н. Чижма // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2012. — № 4 (28). — С. 5–9.

9. Альтман, Е. А. Повышение точности оценки параметров сигналов в электрической сети в системе тягового электроснабжения / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров // Известия Транссиба. — 2012. — № 3(11). — С. 95–100.

10. Елизаров, Д. А. Анализ существующих методов оценки спектральных составляющих напряжения в электроэнергетических системах / Д. А. Елизаров, Ю. В. Дёмин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск. — 2014. — № 4. — С. 191–196.

11. Чижма, С. Н. Многофункциональный измерительный комплекс для анализа электрических величин на тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин, В. С. Циркин // Транспорт Урала. — 2013. — № 2. — С. 67–72.

12. Пат. 88157 Российская Федерация, МПК G01R17/02. Информационно-измерительная система для контроля качества электрической энергии [Текст] / Чижма С. Н., Грицутенко С. С., Альтман Е. А., Газизов Р. И., Циркин В. С.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. — № 2009125776/22 ; заявл. 06.07.2009 ; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. — 7 с.

**ЕЛИЗАРОВ Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика и системы управления». Адрес для переписки: [elizarovda@gmail.com](mailto:elizarovda@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 04.02.2016 г.

© Д. А. Елизаров

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОМ ОБЪЕМЕ

Рассматриваются особенности конструкций топок газотрубных котлов. Приводятся результаты численных расчетов с использованием  $k-\varepsilon$  модели турбулентного горения тепловых процессов в реверсивных и проточных топках для газового топлива. Максимальные значения температуры газовой смеси в объеме и концентрации оксидов азота соответствуют проточной топке.

**Ключевые слова:** газотрубный котел, реверсивная топка, горение, температура, оксиды азота.

Развитие конструкций паровых и водогрейных котлов в начале своего пути шло по двум основным направлениям — газотрубный и водотрубный способ нагрева теплоносителя. В первом случае продукты сгорания двигались изнутри разделительной поверхности, а вода омывала поверхность нагрева снаружи, во втором случае теплоноситель двигался внутри, а дымовые газы — снаружи.

Наибольшую поверхность нагрева (до 300 м<sup>2</sup>) имели комбинированные газотрубные котлы, у которых топкой являлась жаровая труба, а конвективной поверхностью — дымогарные трубки. По ходу дымовых газов существуют агрегаты с оборотом дымовых газов (реверс) в жаровой трубе или с двойным ходом, с тройным ходом дымовых газов [1, 2].

Основным токсичным компонентом, образующимся при сжигании природного газа и мазута в топках газотрубных котлов, являются оксиды азота NO<sub>x</sub>. Оксиды азота оказывают негативное воздействие на здоровье людей, в частности на органы дыхания [3–6].

При сжигании органических топлив в топках котлов азот, содержащийся в топливе и воздухе, взаимодействуя с кислородом, образует оксиды: NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>O. Основная доля образовавшихся в продуктах сгорания паровых и водогрейных котлов NO<sub>x</sub> (95...99 %) приходится на монооксид (оксид) азота NO. Диоксид NO<sub>2</sub> и геммоксид N<sub>2</sub>O азота образуются в значительно меньших количествах.

Образование монооксида (оксида) азота при сжигании органических топлив происходит как за счет окисления азота воздуха N<sub>2</sub>, так и за счет окисления азота, содержащегося в топливе. В настоящее время известны три механизма, по которым происходит образование оксидов азота:

термический, быстрый и топливный. При образовании термических и быстрых NO источником азота является воздух, а в случае образования топливных NO — азотсодержащие составляющие топлива [3–6].

Для описания турбулентных течений реагирующих газов используется модель турбулентности с двумя уравнениями. В ней значения скорости и значения характерной длины определяются с использованием различных транспортных уравнений (отсюда термин — «два уравнения»).

Эта модель турбулентности получила название  $k-\varepsilon$  ( $k$  — турбулентная кинетическая энергия,  $\varepsilon$  — величина рассеивания кинетической энергии) [7–9].

Рассмотрим основные уравнения, которые описывают реагирующую газовую смесь при следующих основных допущениях: газовая смесь, заполняющая топочный объем — серое тело; теплота от факела к стенке в основном переносится излучением и конвекцией; внутри пограничного слоя давление не изменяется вдоль нормали к контуру тела и равно соответствующему давлению на внешней границе пограничного слоя; внутри температурного пограничного слоя члены, характеризующие изменение энергии вследствие конвекции и изменения времени, одного порядка с членами, характеризующими изменение энергии вследствие молекулярной теплопроводности; суммарный перенос теплоты на границе раздела газовой смеси — стенка осуществляется за счет конвективного теплообмена и излучения; реагирующий газ CH<sub>4</sub> — 100 %, окислитель — воздух;

— неразрывности для всей смеси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность газовой смеси;  $U$  — вектор скорости;  $t$  — время;

— неразрывности для каждого компонента:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial x_j} \right) + S_i, \quad (2)$$

где  $S_i$  — скорость образования I-компонента (определяется с учетом кинетической схемы окисления метана);  $Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$  — концентрация вещества I-компонента;  $\rho_i$  — плотность I-компонента;  $\Gamma_{\text{eff}} = \Gamma_i + \frac{\mu_i}{Sc_i}$  — коэффициент диффузии;  $\Gamma_i$  — коэффициент диффузии для I-компонента;  $\mu_i$  — турбулентная составляющая динамической вязкости;  $Sc_i = \frac{\nu}{\Gamma_i}$  — число Шмидта;  $\nu$  — кинематическая вязкость;

— моментов:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T + B, \quad (3)$$

где  $B$  — сумма всех сил, действующих на объем газа,  $\mu_{\text{eff}}$  — эффективная турбулентная вязкость,  $P$  — давление. В формулах (1)–(3) используются следующие обозначения:

$$U = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}, \quad \nabla \cdot U = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z},$$

$$\nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_x) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_x) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_y) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_z) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_z) \end{bmatrix};$$

— энергии и диссипации:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon), \quad (5)$$

где  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  — справочные константы [5];  $P_k$  — параметр турбулентности, характеризует соотношение между силами вязкости и силами, выталкивающими  $P_{kb}$  [8]:

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb}; \quad (6)$$

— определения вязкости:

$k$ - $\varepsilon$  модель основывается на концепции турбулентной вязкости, поэтому

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad (7)$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость. В данной модели предполагается, что турбулентная вязкость  $\mu_t$  связана с турбулентной кинетической энергией и диссипацией через выражение:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где  $C_\mu$  — справочная константа [8].

Переменные  $k$  и  $\varepsilon$  являются результатом решения дифференциальных транспортных уравнений для турбулентных кинетической энергии и диссипации:

— уравнение состояния:

Уравнение состояния, предложенное Редди-хон-Квонгом, выглядит следующим образом [7]:

$$P = \frac{RT}{v - b + c} - \frac{a(T)}{v(v + b)}, \quad (9)$$

где  $v$  — удельный объем. Величины  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — константы, зависящие от конкретного вещества.

Начальные условия. Принимаются значения всех параметров, входящих в систему уравнений, при времени  $t=0$  и при начальной температуре  $T=300$  K.

Граничные условия. Принимаются значения всех переменных, входящих в систему уравнений, на основе рекомендаций [8].

Расчеты концентраций оксидов азота в топочном объеме при наличии турбулентного горения осуществляются вероятностным методом.

Ниже приводятся результаты расчетов по  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентного горения с учетом излучения реагирующих газов (модель излучения P1) с использованием программного комплекса ANSYS-CFX, выполненные для топки газотрубного котла мощностью 200 кВт.

Длина топки — 1 метр. Топливо — природный газ, окислитель — воздух. Скорость подачи метана постоянна (40 м/с), скорость подачи окислителя — переменна.

Температура газовой смеси в топочном объеме является определяющим параметром для определения эффективности работы котла. Также при тепловом расчете данного агрегата необходимо определить концентрации оксидов азота, образующихся при процессе горения.

Топкам газотрубных котлов присуще явление рециркуляции смеси газов.

Движение последних осуществляется в разомкнутой системе и характеризуется коэффициентом рециркуляции  $\gamma$ . Значение  $\gamma$  изменяется от 0 до 1. Причем 0 является характеристикой проточной топки, 1 — характеристика реверсивной. Промежуточные значения  $\gamma$  описывают процессы движения газов для проточной топки с различным соотношением диаметров на входе и выходе.

На рис. 1 изображено изменение максимальной температуры  $T$  от коэффициента рециркуляции  $\gamma$ . Как видно из графика, увеличение доли возврата смеси газов приводит к уменьшению температуры как в ядре факела, так и максимальной во всем топочном объеме.

На рис. 2 приведена зависимость концентрации NO от коэффициента рециркуляции  $\gamma$ .

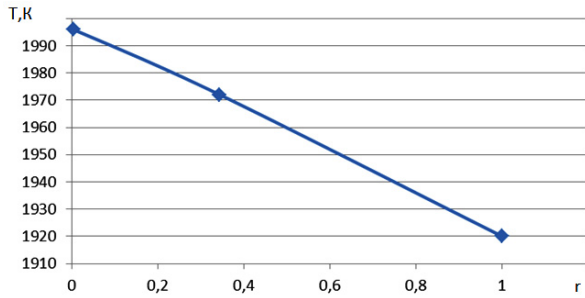


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры T от коэффициента рециркуляции г

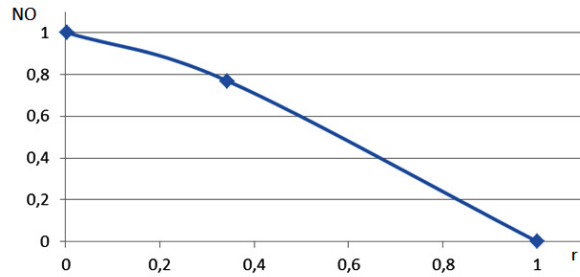


Рис. 2. Зависимость концентрации NO от коэффициента рециркуляции г

Во всем исследуемом интервале для данных величин изменение значений NO определяется законом изменения температуры в объеме, который характеризуется коэффициентом рециркуляции. Поэтому максимальные значения этих величин соответствуют реверсивной топке.

Таким образом, одним из эффективных технологических мероприятий является рециркуляция смеси газов в топке, что обеспечивает снижение температуры факела и выравнивание температурных полей.

При этом за счет разбавления инертными продуктами сгорания реальные концентрации кислорода и топлива в зоне реакции уменьшаются.

В результате происходит интенсивное подавление образования термических оксидов азота.

## Книжная полка

621.311/Г85

Гриценко, В. И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : учеб. пособие / В. И. Гриценко, Ю. Т. Усманский. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии рассмотрены законодательно-правовая и нормативно-техническая базы, приведены новейшие методические материалы по энергосбережению в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Особое внимание уделено конкретным вопросам энергосбережения применительно к источникам теплоты и системам теплоснабжения. Предназначено студентам теплоэнергетического факультета, обучающимся по направлению 140100 «Теплоэнергетика», для специальностей: 140101 «Тепловые электрические станции» и 140104 «Промышленная теплоэнергетика».

## Библиографический список

- Annaratone, D. Steam generators, Springer-Varlag, Berlin, Heidelberg. – 2008. – 434 p.
- Михайлов, А. Г. Эффективные поверхности теплообмена в топке газотрубного котла : моногр. / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков. – Омск : ОмГТУ, 2014. – 120 с.
- Росляков, П. В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / П. В. Росляков, И. А. Закиров. – М. : МЭИ, 2001. – 144 с.
- Михайлов, А. Г. Разработка теоретических основ снижения образования оксидов азота в топках газотрубных котлов / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков, С. В. Теребилов // Политемат. сетевой электрон. науч. журн. Кубанского гос. аграр. ун-та. – 2013. – № 90. – С. 320–332.
- Михайлов, А. Г. Вопросы образования оксидов азота при сжигании газообразных и жидких топлив / А. Г. Михайлов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2009. – № 3 (83). – С. 103–106.
- Михайлов, А. Г. Расчетное исследование влияния геометрических характеристик топки газотрубного котла на процессы образования оксидов азота / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков, С. В. Теребилов // Научные труды SWorld. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 13–22.
- Fenimore, C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flame / C. P. Fenimore // 13-thSympos. (Interm.) On Combustion. – 1971. – P. 373.
- ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0 / ANSYS, Inc. // Southpointe 275 Technology Drive. – Canonsburg : PA 15317, 2006. – 312 p.
- Spolding, D. B. Calculations of Combustion Processes / D. B. Spolding // Rep-t. RF/TN/ A/1–8, 1971, Dept. Of Mechanical Engineering, Imperial College, London, England.

**МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теплоэнергетика».

**НОВИКОВА Элина Эдуардовна**, студентка гр. ТЭ-121 Энергетического института.

**СЛОБОДИНА Екатерина Николаевна**, ассистент кафедры «Теплоэнергетика».

**ТЕРЕБИЛОВ Сергей Викторович**, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: mikhailovand@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2016 г.

© А. Г. Михайлов, Э. Э. Новикова, Е. Н. Слободина, С. В. Теребилов

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОХРАНЕНИЯ ТЕПЛА ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

**В статье представлены традиционные методы теплового расчета кузова пассажирского вагона. Этим методом недостаточно для определения изменений в эффективности теплоизоляционного материала в процессе эксплуатации пассажирского вагона. Основной целью статьи является адаптация расчетов теплоустойчивости, используемых при строительстве зданий, для оценки эффективности ограждающей конструкции вагона сохранять тепло.**

**Ключевые слова:** теплоизоляция, теплоустойчивость, теплопроводность, вагон.

Конструкция кузова пассажирского вагона отличается тем, что должна препятствовать передаче тепла через стены ограждения, поэтому стены, пол и крыша выполняются многослойными с использованием теплоизоляционных материалов.

Качество теплоизоляции зависит от многих свойств используемых материалов. Теплоизоляция является одним из важнейших элементов конструкции кузова. Поэтому к материалам, используемым для теплоизоляции кузовов пассажирских вагонов при их строительстве и капитально-восстановительных ремонтах предъявляются жесткие требования, регламентированные нормами ОСЖД (Памятка ОР538/1).

Срок службы теплоизоляции должен соответствовать сроку службы вагона, то есть 28 лет [1].

Цельнометаллический кузов вагона обладает большой герметичностью и способностью аккумулировать тепло или холод.

При несоблюдении необходимого температурного и вентиляционного режимов возможно осаждение росы на внутренних металлических поверхностях кузова, что влечет за собой быстрый износ защитного покрытия слоя краски и разрушение металла коррозией.

Пространство кузова заполнено изоляционным материалом, который заложен в ячейки обрешетки между наружной металлической и внутренней деревянной обшивками кузова (рис. 1) [2]. На вагонах современной постройки в качестве теплоизоляции широко применяются многослойные сэндвич-панели, содержащие такие материалы, как пенополиуретан, пенополистирол, вспененный фенопласт. Эти пенопласты имеют малую плотность, объемную массу, низкую теплопроводность и являются водостойкими [3].

Для проведения расчета теплопроводности необходимы данные по толщинам слоев различных участков стен, потолка и пола ограждения, по пло-

щади этих участков и по материалам слоев. Эти данные содержатся в проектно-технических характеристиках вагона.

Общую площадь теплопередающей поверхности пассажирского вагона следует определять по наружным размерам пассажирского помещения. На рис. 2 схематично показан разрез ограждения кузова пассажирского вагона с основными размерами.

Для более точного определения теплотехнических качеств пассажирских вагонов необходимо применить комплексный метод, включающий определение среднего коэффициента теплопередачи ограждений кузова, герметичности кузова и амплитуды колебания температур.

Для расчета теплотехнических показателей пассажирского вагона необходимо провести аэродинамическое исследование для определения показателей герметичности ограждающих конструкций и показателей температур поверхности. Аэродинамическое исследование — это новшество в тестировании вагонов на наличие неплотностей в теплоизоляции, которое проводится с использованием комплекта специального диагностического оборудования, основными компонентами которого являются измерительный вентилятор большой мощности и цифровой двухканальный манометр, отслеживающий изменение давления воздуха и управляющий работой вентилятора.

Использование аэродинамического испытания в сочетании с тепловизионным обследованием — гарантия выявления многих скрытых дефектов, вызывающих ускоренное разрушение несущих конструкций и являющихся главной причиной повышенных затрат на отопление (кондиционирование). При этом обнаружение этих дефектов каким-либо другим способом невозможно [1].

Герметичность кузова определяется конструкцией ограждающих поверхностей и используемыми

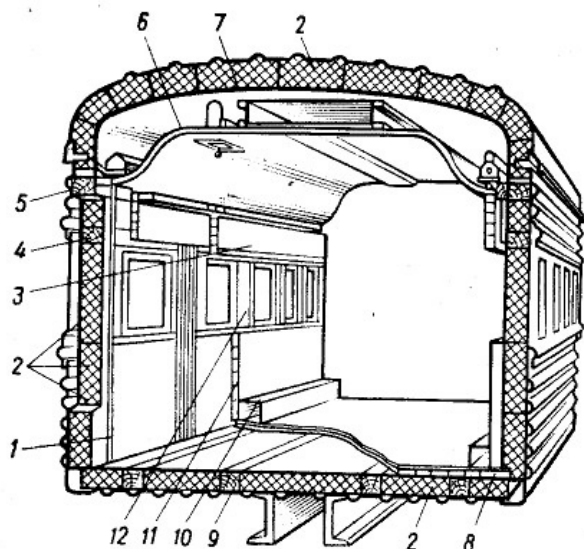


Рис. 1. Ограждение кузова пассажирского вагона с изоляцией и облицовкой

1 — гидроизоляционная бумага; 2 — пакеты теплоизоляции; 3 — надоконная обшивка; 4, 5, 9 — бруски обрешетки; 6 — подшивной потолок; 7 — обшивка крыши; 8 — обшивка пола; 10 — кожух; 11 — обшивка подоконной поверхности; 12 — обшивка междуоконная

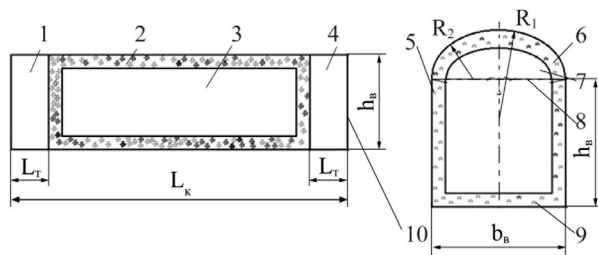


Рис. 2. Схема планировки кузова пассажирского вагона а) продольное; б) поперечное:

1, 4 — тамбур; 2 — теплоизоляционное ограждение; 3 — пассажирское помещение; 5 — боковая стена; 6 — крыша; 7 — воздушная прослойка; 8 — фальшпотолок; 9 — пол; 10 — торцевая стена

теплоизоляционными материалами. Конструкция ограждения современного пассажирского вагона представляет собой многослойную стену. Элементы ограждения кузова пассажирского вагона приведены на рис. 3 и 4.

Герметичность конструкции кузова вагона необходимо определять, измеряя воздухообмен внутреннего объема вагона и окружающей среды. Перед испытаниями на герметичность помещение изо-термического вагона тщательно герметизируют — проверяют состояние уплотнения дверей, вентиляционных каналов, штатных уплотнений сливных приборов, вводы трубопроводов и кабелей от холодильной установки. Разность температур наружного воздуха и грузового помещения не должна быть больше 3°C.

Суть испытаний заключается в определении величины утечки воздуха при поддержании в помещении избыточного давления 50 Па (5 мм вод. ст.). Для этого через одно из сливных отверстий в помещение через расходомер подается воздух и с помощью микроманометра контролируется величина давления в помещении. Вагон считается

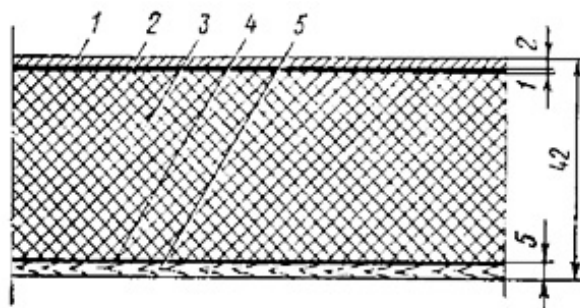


Рис. 3. Многослойная однородная стена (зона сплошной изоляции крыши пассажирского вагона):

1 — стальной лист наружной обшивки; 2 — слой антикоррозийной противоразрушающей мастики; 3 — теплоизоляция; 4 — влагозащитная пленка; 5 — внутренняя обшивка

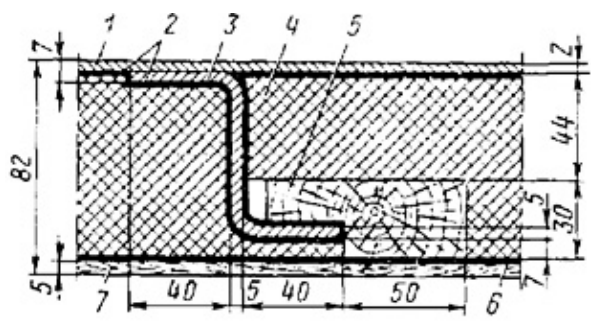


Рис. 4. Многослойная неоднородная стена (зона дуги крыши пассажирского вагона):

1 — стальной лист наружной обшивки; 2 — слой антикоррозийной противоразрушающей мастики; 3 — стальной прокатный профиль (дуга); 4 — теплоизоляция; 5 — деревянный брусок; 6 — влагозащитная пленка; 7 — внутренняя обшивка

выдержавшим испытания, если величина утечки воздуха не превышает 40 м<sup>3</sup>/ч.

Если передача тепла происходит в стационарных условиях через плоскую однородную стенку (рис. 5) в направлении, перпендикулярном ее поверхности, уравнение теплопроводности запишем в виде:

$$Q_T = \frac{\lambda}{\delta(T_1 - T_2)F} = \frac{1}{R(T_1 - T_2)F}, \quad (1)$$

где  $Q_T$  — суммарный тепловой поток, Вт;

$\delta$  — толщина стенки, м;

$T_1, T_2$  — значения температуры на поверхности стенки, К;

$F$  — площадь стенки, м<sup>2</sup>;

$R = \frac{\delta}{\lambda}$  — сопротивление теплообмена.

Стенка пассажирского вагона состоит из нескольких слоев разнородного материала. Схема передачи тепла через такую стенку приведена на рис. 6 [4].

Коэффициент теплопередачи для многослойной стенки определим из следующего выражения:

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_B}} = \frac{1}{R_\lambda - R_\alpha} = \frac{1}{R}, \quad (2)$$

где  $\delta_i$  — толщина отдельных слоев материалов, составляющих конструкцию ограждения, м;

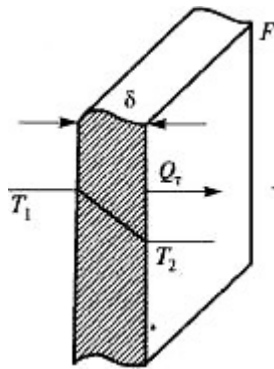


Рис. 5. Теплопередача через плоскую однородную стенку

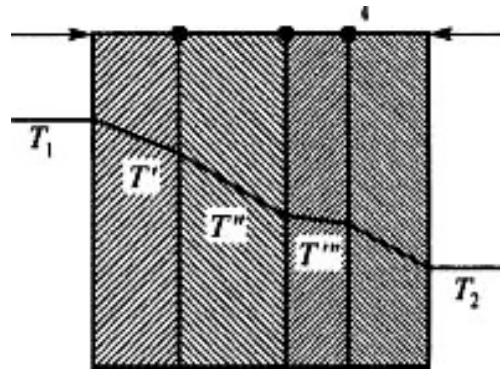


Рис. 6. Теплопередача через многослойную стенку

$\lambda_i$  — действительные значения коэффициентов теплопроводности соответствующих материалов, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$R_\lambda$  — термическое сопротивление теплопроводности;

$R_a$  — термическое сопротивление конвекции.

В общем случае общая площадь теплопередающей поверхности пассажирского вагона определяется по выражению:

$$F_{\text{общ}} = F_{\text{П}} + 2 \cdot F_{\text{б}} + F_{\text{К}} + 2 \cdot F_{\text{Т}} - F_{\text{О}}, \quad (3)$$

где  $F_{\text{П}}$  — площадь поверхности пола, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{б}}$  — площадь боковой стены, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{К}}$  — площадь крыши, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{Т}}$  — площадь торцевой стены, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{О}}$  — суммарная площадь всех окон пассажирского помещения вагона, м<sup>2</sup>.

Площадь поверхности пола определяется по выражению:

$$F_{\text{П}} = (L_{\text{К}} - 2 \cdot L_{\text{Т}}) \cdot b_{\text{В}}, \quad (4)$$

где  $L_{\text{К}}$  — длина вагона по концевым балкам, м;

$L_{\text{Т}}$  — длина тамбура вагона, м;

$b_{\text{В}}$  — наружная ширина вагона, м.

Выражение для определения площади боковой стены:

$$F_{\text{б}} = (L_{\text{К}} - 2 \cdot L_{\text{Т}}) \cdot h_{\text{Б}} - F_{\text{О}}, \quad (5)$$

где  $h_{\text{Б}}$  — высота боковой стены, м.

Площадь поверхности крыши определяется по выражению:

$$F_{\text{К}} = (L_{\text{К}} - 2 \cdot L_{\text{Т}}) \cdot \pi \cdot R_{\text{Н}} \cdot \frac{\varphi}{180}, \quad (6)$$

где  $R_{\text{Н}}$  — радиус сечения крыши, м;

$\varphi$  — угол, ограничивающий дугу, °.

Угол, ограничивающий дугу:

$$\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{b_{\text{В}}}{2 \cdot R_{\text{Н}}}, \quad (7)$$

откуда:

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b_{\text{В}}}{2 \cdot R_{\text{Н}}}\right). \quad (8)$$

Площадь торцевой стены определяется по выражению:

$$F_{\text{Т}} = b_{\text{В}} \cdot h_{\text{В}}. \quad (9)$$

Так как ограждающими элементами кузова пассажирского вагона являются боковые и торцевые стены, окна, пол, крыша, то рассчитывают средний коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} K_i \cdot F_i}{F}, \quad (10)$$

где  $K_i$  — коэффициент теплопередачи  $i$ -го элемента ограждения внутреннего помещения вагона, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$F_i$  — среднегеометрическая площадь  $i$ -го элемента, м<sup>2</sup>;

$F$  — среднегеометрическая площадь ограждения внутреннего помещения вагона, м<sup>2</sup>.

В общем случае коэффициент теплопередачи  $i$ -го элемента ограждения определяется по следующей зависимости:

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{Н}_i}} + \sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}_i}}}, \quad (11)$$

где  $\alpha_{\text{Н}_i}$ ,  $\alpha_{\text{В}_i}$  — коэффициенты теплоотдачи соответственно наружной и внутренней поверхности  $i$ -го элемента ограждения, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\delta_j$  — толщина  $j$ -го слоя в  $i$ -ом элементе, м;

$\lambda_j$  — коэффициент теплопроводности  $j$ -го слоя в  $i$ -ом элементе, Вт/(м · К).

Сумма отношений толщины и коэффициента проводимости равна, Вт/К [5]:

$$\sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}. \quad (12)$$

При проектировании объектов капитального строительства недостаточно определить теплоизоляционные свойства здания. Оценивается теплоустойчивость — свойство ограждающей конструкции сохранять при колебаниях потока тепла относительное постоянство температуры на поверхности, обращенной в помещение. От постоянства температуры на внутренней поверхности ограждающих конструкций зависит обеспечение условий комфорта для пребывающих в вагоне людей.

Теплоустойчивость ограждающей конструкции обеспечивается преимущественно теплоемкостью слоя подверженного более резким колебаниям температур. При изменении наружной температуры



тепло, накопленное в слое, обеспечивает относительное постоянство температуры внутреннего воздуха.

Ограждающая конструкция вагона должна обладать минимальной паропроницаемостью и теплопроводностью и в то же время быть теплоемкой и теплоустойчивой.

При рассмотрении теплоустойчивости сначала решается задача для однослойной однородной стенки, когда тепловая и температурная волны направлены от среды с одной ее стороны к поверхности на другую, со стороны которой температура среды постоянна. Ось  $x$  направлена навстречу температурной волне. При этом с приближением к наружной стенке увеличиваются амплитуды колебаний температуры. Рассмотрим расчеты амплитуды ограждающих конструкций.

Для внутренней поверхности ограждающих конструкций амплитуду колебаний температуры определяют по формуле:

$$A_{t_E} = \frac{A_{t_H}^{расч}}{\nu}, \quad (13)$$

где  $A_{t_H}^{расч}$  — расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха, °С;

$\nu$  — коэффициент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха в ограждающей конструкции.

Расчетную амплитуду колебаний температуры наружного воздуха  $A_{t_H}^{расч}$ , °С следует определять по формуле:

$$A_{t_H}^{расч} = 0,5A_{t_H} + \frac{\rho(I_{max} - I_{cp})}{\alpha_H}, \quad (14)$$

где  $A_{t_H}$  — максимальная амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха в июле, °С, принимаемая согласно СП 131.13330;

$\rho$  — коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности ограждающей конструкции;

$I_{max}$ ,  $I_{cp}$  — соответственно максимальное и среднее значения суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной), Вт/м<sup>2</sup>, принимаемые согласно СП 131.13330 для наружных стен — как для вертикальных поверхностей западной ориентации и для покрытий — как для горизонтальной поверхности;

$\alpha_H$  — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции по летним условиям, Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Величину затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха  $\nu$  в ограждающей конструкции, состоящей из однородных слоев, следует определять по формуле:

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_B)(s_2 + Y_1)...(s_n + Y_{n-1})(\alpha_H + Y_n)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2)...(s_n + Y_n)\alpha_H}, \quad (15)$$

где  $e$  = 2,718 — основание натуральных логарифмов;

$D$  — тепловая инерция ограждающей конструкции;

$s_1, s_2, \dots, s_n$  — расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);

$Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n$  — коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);

$\alpha_B, \alpha_H$  — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей ограждающих конструкций соответственно, Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Порядок нумерации слоев в формуле (15) принят в направлении от внутренней поверхности к наружной. Адаптируя методики определения теплоустойчивости зданий, необходимо обратить внимание на то, что теплоустойчивость конструкций зданий зависит от порядка расположения слоев материалов; величина затухания амплитуды колебаний температуры наружного воздуха в многослойной конструкции увеличивается, если более теплоустойчивый материал расположен изнутри.

Наличие в конструкции ограждения воздушной прослойки увеличивает теплоустойчивость конструкции. В замкнутой воздушной прослойке целесообразно устраивать теплоизоляцию с теплоотражающей поверхностью, слои конструкции, расположенные между вентилируемой наружным воздухом воздушной прослойкой и наружной поверхностью ограждающей конструкции, должны иметь минимально возможную толщину. Наиболее целесообразно выполнять эти слои из тонких металлических или асбестоцементных листов.

Таким образом, применение комплексного подхода в определении теплотехнического состояния вагона необходимо для выявления более точных показателей, что ускорит процесс нахождения дефектов теплоизоляции и герметичности кузова вагона, а в дальнейшем, при ремонте вагона, позволит подобрать наиболее надежный теплоизоляционный материал и сократит энергетические расходы на поддержание комфортных условий в пассажирском вагоне. Адаптация теплотехнического расчета зданий, а именно расчеты теплоустойчивости и амплитуды температур, под вагоны дополнит оценку эффективности ограждающей конструкции вагона сохранять тепло и позволит создать новую конструкцию, увеличивающую теплоустойчивость вагона.

#### Библиографический список

1. Клюка, В. П. Испытание пассажирских вагонов железных дорог на теплоустойчивость / В. П. Клюка, А. П. Стариков, Д. Ю. Кузьменко, А. А. Попов // Известия Транссиба. — 2015. — № 2 (22). — С. 6.
2. Конструирование и расчет вагонов : учеб. для вузов / В. В. Лукин [и др.] ; под ред. В. В. Лукина. — М. : УМК МПС России, 2000. — С. 659–660.
3. Егоров, В. П. Устройство и эксплуатация пассажирских вагонов (для проводников) : учеб. пособие / В. П. Егоров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : УМЦ МПС России, 2004. — С. 74–75.
4. Техническая диагностика вагонов : учеб. В 2 ч. Ч. 2 / Р. А. Ахмеджанов [и др.] ; под ред. В. Ф. Криворудченко. — М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — С. 67–71.
5. Матяш, Ю. И. Система кондиционирования и водоснабжения пассажирских вагонов : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / Ю. И. Матяш, В. П. Клюка. — М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — С. 32–41.

**СТАРИКОВ Александр Петрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: omskstar2003@mail.ru

**КУЗЬМЕНКО Дмитрий Юрьевич**, аспирант кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: legolas-omsk@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2016 г.

© А. П. Стариков, Д. Ю. Кузьменко

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА РЕЗЕРВУАРОВ ХРАНИЛИЩА СЖИЖЕННОГО ГАЗА КАК ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КАК ТЕПЛООБМЕННОЙ СИСТЕМЫ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Решение задач энерго- и ресурсосбережения как для нефтедобывающих компаний, так и для предприятий, добывающих и транспортирующих природный газ, связано с развитием технологий сжиженного углеводородного газа. Повышение эффективности эксплуатации хранилищ сжиженных продуктов предполагает проведение соответствующего топологического и функционального анализа резервуарных парков в общем случае как теплообменных систем сложной структуры.

**Ключевые слова:** резервуарный парк, теплообменная система, сжиженный газ, ресурсосбережение.

Развитие технологий производства, хранения и использования сжиженного природного газа (СПГ) связано с решением задач энергосбережения как для нефтедобывающих компаний (получение газоконденсата и газового топлива из попутного газа), так и для предприятий, добывающих и транспортирующих природный газ [1–3].

В то же время в мировой практике все более широко используются системы газознергоснабжения потребителей, промышленные объекты которых обеспечиваются смесями пропан-бутана (СПБ) смесями сжиженного углеводородного газа (СУГ) от резервуарных установок, хранилищ, являющихся элементами СПГ-технологий [4].

Повышение эффективности эксплуатации хранилищ СУГ, представляющих собой резервуарные парки (РП), требует в том числе сокращения потерь хранимых продуктов; снижения энергопотребления при эксплуатации (прием, хранение, откачка СУГ).

Это на системном уровне может быть реализовано, например, при помощи системы газовых обвязок (СГО), газоуравнительных систем (ГУС), изотермического хранения [3–6].

Рациональное применение данных системных средств предполагает проведение соответствующего анализа, в рамках которого необходимо:

— определить особенности структуры теплообменной системы, образованной парком резервуаров с учетом способа снижения потерь хранимых продуктов;

— выделить расчеты (в том числе тепловые) резервуарного парка, представляющего собой в общем случае теплообменные системы сложной структуры.

Это позволит определить значения важных эксплуатационных параметров:

— температура продукта в определенный момент времени в отдельном резервуаре или их группе для режимов приема, хранения и откачки-налива;

— температура продукта в определенный момент времени в отдельной цистерне или их группе для режима налива;

— время, за которое температура продукта достигнет заданного уровня, а также получить ответы на ряд существенных вопросов, возникающих при проектировании:

— обеспечивается ли для заданного способа снижения потерь хранимых продуктов (теплообменной системы заданной структуры) требуемый температурный режим  $T_{ii}^{\min} \leq T_{ii}(\tau) \leq T_{ii}^{\max}$ ,  $i = \overline{1, 12}$ , где  $T_{ii}(\tau)$  — температура продукта в  $\tau$ -й момент времени для  $i$ -го месяца эксплуатации;  $T_{ii}^{\min}$ ,  $T_{ii}^{\max}$  — допустимые минимальные (для зимнего периода эксплуатации) и максимальные (для летнего периода эксплуатации) температуры продукта;

— удовлетворяют ли принятые проектные решения по теплообогреву и теплоизоляции резервуаров требуемому температурному диапазону для режимов приема, хранения и откачки-налива продукта.

Например, хранение СПБ в хранилище нефтебазы на станции Коротчаево предусматривается в шаровых резервуарах, которые можно разбить на три группы. Первая группа резервуаров осуществляет прием продукта (резервуар заполняется азотом, затем происходит прием продукта и вытеснение азота на факельную установку, наполнение резервуаров происходит последовательно). Вторая

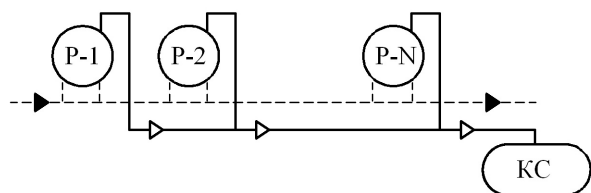
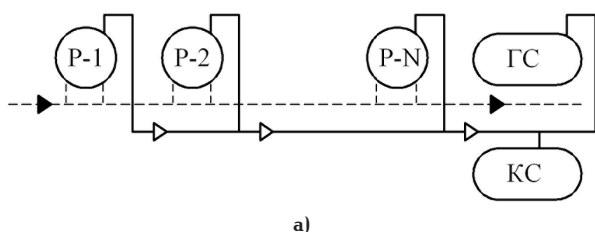
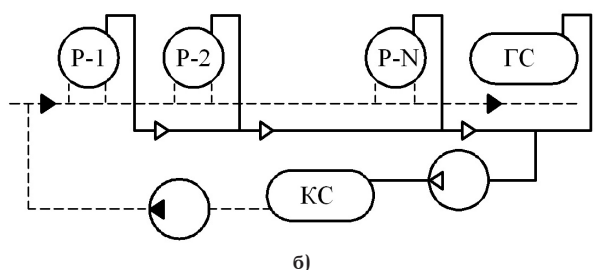


Рис. 1. Хранилище СПБ с системой газовых обвязок: Р — резервуар, КС — конденсатосборник



а)



б)

Рис. 2. Хранилище СПБ с газоуравнительной системой (а) и дополнительно с системой компримирования легких фракций (б): Р — резервуар, КС — конденсатосборник, ГС — газосборник

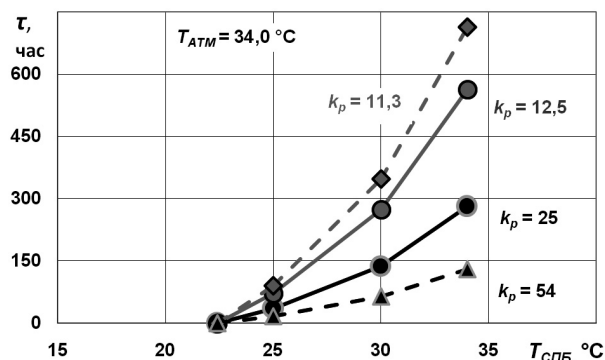


Рис. 3. Время хранения СПБ до заданной температуры для различных типов резервуаров при  $T_{АТМ} = 34,0^{\circ}\text{C}$

группа резервуаров работает в режиме хранения (резервуары опечатаны и проходят паспортизацию, сброс азота при изменении давления, температуры выполняется на свечу рассеивания).

Третья группа обеспечивает налив продукта в железнодорожные цистерны (откачка продукта из резервуара и заполнение его азотом).

Применение системы газовых обвязок (системы трубопроводов, объединяющих газовые пространства резервуаров с одинаковым продуктом хранения (рис. 1)) позволяет в рамках операции заполнения одних резервуаров (при совпадении по времени с опорожнением других) части паровоз-

душной смеси из заполняемых резервуаров переходить не в атмосферу, а в эти опорожняемые (или свободные) резервуары [6].

Более широкими возможностями обладают газоуравнительные системы (ГУС), включающие специальный газосборник (ГС) постоянного или переменного объема (рис. 2а) для аккумуляции части паровоздушной смеси при несовпадении операций закачки — выкачки [6], в том числе с использованием системы компримирования легких фракций (рис. 2б).

В рамках теплового анализа тепловой (температурный) к.п.д.  $\eta^p(\tau)$  отдельного полностью заполненного СПБ шарового резервуара (опечатанного и находящегося в режиме хранения) за время  $\tau$  является функцией времени и выражает соотношение между фактическим переданным количеством теплоты  $Q^p$  и тем максимальным возможным количеством теплоты  $Q_{MAX}^p$ , которое может быть передано от окружающей среды (атмосферного воздуха) продукту  $T_{П,i}(\tau) \leq T_{АТМ}$ , или от продукта окружающей среде  $T_{П,i}(\tau) \geq T_{АТМ}$  в резервуаре с бесконечно большим значением коэффициента теплопередачи  $k$  или бесконечно большой поверхностью теплообмена  $F$  (или за бесконечное время).

$$\eta^p(\tau) = \frac{Q^p}{Q_{MAX}^p} = \frac{F_p k_p \Delta T_{СПБ}(\tau) \cdot \tau}{F_p k_p \cdot \Delta T_{MAX}(\tau) \cdot \tau} = \frac{M_{СПБ} C_{СПБ} (T_{СПБ\_Н} - T_{СПБ\_К}(\tau))}{M_{СПБ} C_{СПБ} (T_{СПБ\_Н} - T_{АТМ}(\tau))}, \quad (1)$$

где  $T_{СПБ\_Н}$ ,  $T_{СПБ\_К}$ ,  $T_{АТМ}$  — начальная и конечная температура СПБ;  $T_{АТМ}$  — температура атмосферного воздуха;  $M$ ,  $c$  — масса и теплоемкость СПБ.

Тогда при хранении продукта в течение единицы времени (например, в течение часа) температурный к.п.д. будет иметь конкретное значение

$$\eta^p(\tau = 1) = \frac{T_{СПБ\_Н} - T_{СПБ\_К}}{T_{СПБ\_Н} - T_{АТМ}}, \quad (2)$$

а коэффициент эффективности термостатирования резервуара

$$E_i^p = 1 - \eta^p(\tau = 1) = 1 - \frac{T_{СПБ\_Н} - T_{СПБ\_К}}{T_{СПБ\_Н} - T_{АТМ}} = \frac{T_{СПБ\_К} - T_{АТМ}}{T_{СПБ\_Н} - T_{АТМ}}. \quad (3)$$

Время  $\tau_T$  необходимое для достижения температуры СПБ заданного значения  $T = T_{СПБ\_К}$  (при заданных  $M$ ,  $k$ ,  $F$ ) можно определить по выражению (4)

$$\tau_T = \frac{M_{СПБ} C_{СПБ} \cdot (T_{СПБ\_Н} - T_{СПБ\_К})}{F_p k_p \cdot (T_{СПБ\_СР} - T_{АТМ})}. \quad (4)$$

Соответственно, для температуры продукта после  $\tau$  часов хранения

$$T_{СПБ\_К} = T_{СПБ\_Н} - \frac{F_p k_p \cdot \tau \cdot (T_{СПБ\_СР} - T_{АТМ})}{M_{СПБ} C_{СПБ}}. \quad (5)$$

На рис. 3 отражены результаты расчетов времени хранения СПБ, обеспечивающего заданную конечную температуру продукта  $T_{СПБ\_К}$  для различных типов резервуаров объема  $2000 \text{ м}^3$  (шаровой металлический неизолированный наземный резервуар, шаровой металлический изолированный наземный резервуар, цилиндрический подземный резервуар)

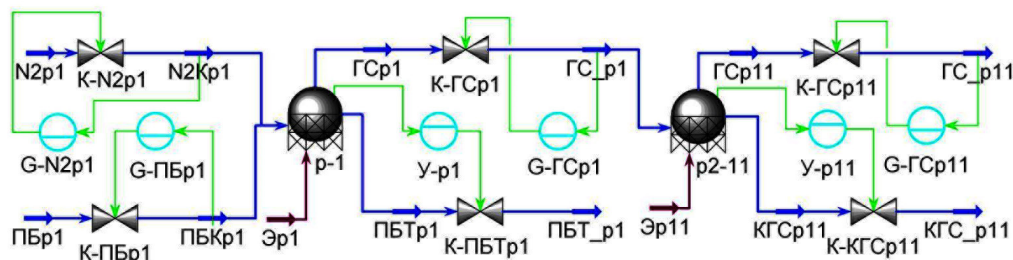


Рис. 4. Технологическая схема группы резервуаров, связанных ГУС

при максимальной температуре атмосферного воздуха  $T_{ATM} = 34^\circ\text{C}$ .

Для металлического неизолированного наземного резервуара коэффициент теплопередачи  $k_p = 25$  кДж/(м<sup>2</sup>·ч·°С), для металлического изолированного наземного резервуара  $k_p = 12,5$  кДж/(м<sup>2</sup>·ч·°С), для подземного резервуара  $k_p = 11,3$  кДж/(м<sup>2</sup>·ч·°С)[7].

При частичном заполнении шарового резервуара (режим приема или откачки) процессы испарения и конденсации хранимого продукта (в рамках «большого и малого дыхания», «обратного выдоха» и т.д.) становятся более существенными. Это связано с изменениями объема газового пространства (ГП), средней концентрации, температуры и давления газообразных углеводородов, что приводит к перетеканию последних в рамках систем СГО или ГУС в ГП других резервуаров или в мягкие резервуары-газольдеры и требует соответствующего учета при тепловом расчете.

Для частично заполненного шарового резервуара или для группы резервуаров (ГР), связанных СГО или ГУС, тепловой анализ может быть проведен с учетом структурных особенностей образованной теплообменной системы с использованием соответствующей функции тепловой эффективности ТС (или эффективности термостатирования) на базе элементарных теплообменных систем [8].

$$\eta^{GP}(\tau) = \sum_{j=1}^N \left( \frac{T_{OH} - T_{BHj}}{T_{OH} - T_{BHr}} \right) \cdot V_{jN}^O(\tau), \quad (6)$$

где  $T_{BHr} = \min_{k=1,K} \{T_{BHk}\}$ ;  $V_{jN}^O(\tau) = A(p_{jN}^O, L_{jN}^O, R_{jN}^O, O_{jN}^O)$  — функция тепловой эффективности ТС одной из элементарных (перекрестная схема, с общим лупингом, с общим рециклом, с общим обращением основного потока) или произвольной схемы, приведенная к  $j$ -му элементу схемы;  $A$  — алгоритмический оператор, определяющий порядок расчета произвольной ТС в соответствии с правилами следования и вложения;  $T_{OH}$ ,  $T_{BH}$  — начальные температуры отдающей и воспринимающей тепло сред.

Этот анализ может быть также реализован и при помощи соответствующих программных средств. Технологическая схема для динамического расчета

группы резервуаров P1–P11 с учетом использования газоуравнительной системы отражена на рис. 4.

#### Библиографический список

1. Кириллов, Н. Г. Природный газ как энергетическое топливо: стратегия, использования и технологии сбережения / Н. Г. Кириллов // Нефтегазовые технологии. — 2002. — № 1. — С. 14–22.
2. Мартен, П. И. Новая концепция производства СПГ / П. И. Мартен, П. Бултан // Газовая промышленность. — 2005. — № 1. — С. 64–66.
3. Вещицкий, В. А. Изотермическое хранение сжиженных газов / В. А. Вещицкий. — Л.: Недра, 1970. — 190 с.
4. Вильямс, А. Ф. Сжиженные нефтяные газы / А. Ф. Вильямс, В. А. Ломм. — 2-е изд., перераб. — М.: Недра, 1985. — 339 с.
5. Усачев, А. П. Повышение энергоэффективности и безопасности систем хранения и испарения сжиженного углеводородного газа / А. П. Усачев, А. Л. Шурайц, Т. А. Усачева // Энергосбережение 2008: материалы VI Междунар. специализир. выставки. — Уфа: ГУП «ИПТЭР», 2008. — С. 24–26.
6. Коршак, А. А. Ресурсосберегающие методы и технологии при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов. — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. — 192 с.
7. Шалай, В. В. Проектирование и эксплуатация нефтебаз и АЗС: учеб. пособие / В. В. Шалай, Ю. П. Макушев. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. — 296 с.
8. Парфенов, В. П. Оценка тепловой эффективности теплообменного оборудования при комбинированном охлаждении сжатых газов в компрессорных установках / В. П. Парфенов, И. А. Январев // Известия вузов. Машиностроение. — 1998. — № 1–3. — С. 62–67.

**ЯНВАРЕВ Игорь Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета.

**КРУПНИКОВ Антон Владимирович**, главный инженер ОАО «Сибнефтетранспроект», г. Омск. Адрес для переписки: iayanvarev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2016 г.

© И. А. Январев, А. В. Крупников