



# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.431.36:662.758

**В. Р. ВЕДРУЧЕНКО**  
**В. В. КРАЙНОВ**  
**М. В. КОКШАРОВ**  
**Н. В. ЖДАНОВ**  
**Е. С. ЛАЗАРЕВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения

## **ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В ДИЗЕЛЯХ**

Проанализированы апробированные на практике и в опытах наиболее удачные технические и технологические решения проблемы топливоподготовки смесевых топлив как нефтяного происхождения, так и альтернативных (из нефтяного сырья), позволяющие решать задачи уменьшения вредных выбросов при работе дизелей. Рассмотрены особенности конструкций смесительных устройств, предложены методики выбора и определения совместимости топлив с разными свойствами для создания эффективных смесей.

**Ключевые слова:** топливо, химмотология, топливные смеси, смесители, дизельные двигатели, альтернативное топливо.

Введение. В настоящее время в России ежегодно потребляется около 100 млн т моторных топлив, производимых из нефти. При этом транспорт является одним из основных потребителей нефтепродуктов и останется главным потребителем мо-

торных топлив на период до 2040–2050 гг. [1–4]. В ближайшей перспективе ожидается увеличение потребления нефтепродуктов, в том числе тяжелых нефтяных как более дешевых, при примерно постоянных объемах их производства, нарастающий

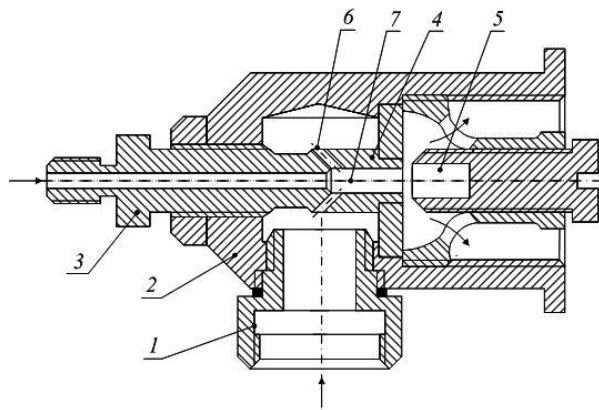


Рис. 1. Конструкция вихревого смесителя с резонатором:  
 1 — штуцер менее вязкого топлива; 2 — корпус;  
 3 — штуцер более вязкого топлива;  
 4 — головка гомогенизирующая; 5 — резонатор;  
 6 — тангенциальные каналы; 7 — полость

дефицит моторных топлив из нефти и дальнейшее загрязнение окружающей среды от работы ДВС [1, 2].

**Способы кавитационной обработки топлива.** Наиболее распространенным и широко применяемым на судах способом обработки тяжелого топлива является гидродинамический, при котором сначала происходит сжатие топлива до высокого давления, а затем — мгновенное расширение в гомогенизирующей головке аппарата, в которой и возникают кавитационные явления сразу же после истечения топлива [2, 4–11].

Так как тяжелое топливо представляет собой смесь низко- и высокомолекулярных углеводородов, то при истечении его из гомогенизирующей головки с большой скоростью происходит разделение легких и тяжелых молекул. Обладающие меньшей кинетической энергией легкие молекулы будут отклоняться к периферии потока, а тяжелые — к его оси. Такое разделение молекул нежелательно, поскольку кавитационные зоны образуются в основном по периферии истекающей топливной струи.

Можно добиться устранения этого недостатка и обеспечить возникновение кавитационных зон по всему выходному сечению топливной струи [11]. Клапанные гомогенизаторы нашли широкое применение в различных областях техники [2, 6, 9, 11].

Гидродинамическая обработка топлива разрушает структурные системы и распределяет их в топливной среде. Глобулы воды легко разбиваются на мельчайшие частички (3–5 мкм) при сравнительно невысоких давлениях.

Значительно улучшить структуру топливной смеси можно, используя различного рода смесительные устройства, например, гомогенизаторы-смесители статического и динамического типа.

В статическом смесителе потоки смешиваемых топлив делятся на отдельные струи, перемешивание которых происходит при изменении направления их движения [2, 11]. Динамические смесители обеспечивают более высокую гомогенность и меньшую вероятность потери стабильности смеси [11].

**Ультразвуковые гомогенизаторы и смесители.** Ультразвуковые гомогенизаторы в отличие от клапанных используют значительно меньший перепад давлений. В них достаточно обеспечить 0,4–0,8 МПа. При прохождении топлива через неподвижные каналы различных конфигураций (цилиндрические тангенциально расположенные каналы, каналы

в виде спирали Архимеда и др.) поток срывается с кромок среза, генерируя при этом упругие колебания, способствующие гомогенизации.

**Смеситель вихревой с резонатором.** Доработанная нами конструкция такого смесителя приведена на рис. 1. Аппарат состоит из корпуса 2, в который ввернуты штуцеры 1 и 3. Внутри корпуса размещена гомогенизирующая головка с тангенциальными каналами а. Жидкость под давлением 0,3–0,5 МПа поступает через штуцер 1 к тангенциальным каналам а, откуда истекает в полость б гомогенизирующей головки 4, где из-за столкновения струй и их завихрения эжектирует жидкость, поступающую через штуцер 3, и интенсивно перемешивается с ней. В полости б, вследствие истечения топлива и его завихрения генерируются упругие колебания, способствующие диспергированию топлива. Для усиления эффекта гомогенизации на выходе из гомогенизирующей головки установлен резонатор 5, который усиливает возникающие упругие колебания в потоке топлива. В рассмотренном аппарате, с одной стороны, происходит хорошее смешение топлив, а с другой — их гомогенизация.

На речном флоте для смешения дизельного и более тяжелого (преимущественно по фракционному составу, вязкости, плотности, сжимаемости и др.) применяется ультразвуковой гидродинамический смеситель-дозатор типа УЗГС-5000, принцип действия которого основан на способе генерации колебаний звуковых и ультразвуковых частот в потоках жидкости (по авторскому свидетельству № 313574 (СССР)). Устройство смешивает различные нефтепродукты в любых заданных пропорциях. В результате ультразвуковой кавитационной обработки образуются гомогенные стабильные топливные смеси [1, 3, 11].

Дозировка дизельного и тяжелого топлив в смесителе осуществляется посредством регулируемых проходных сечений между корпусами резонаторов первой и второй ступени с промежуточным резонатором. Резонаторы перемещаются вдоль смесителя при вращении рукоятки дозирующего устройства [1, 3, 11].

**Метод проверки топливных смесей на стабильность и совместимость** [5, 6]. Проверка топлива или топливных смесей на стабильность может быть проведена через определение общего содержания осадка с применением метода горячей фильтрации [6]. Пробу топлива подвергают старению путем нагревания в течение 24 часов при 100°C, в ходе которого из топлива интенсивно выпадают в осадок находящиеся в нем асфальтены. Затем пробу пропускают через фильтр, все задержанные фильтром компоненты взвешивают и оценивают в процентном отношении. В дистиллатных топливах осадок должен отсутствовать или, по крайней мере, не превышать уровня 0,05 %, в остальных случаях — не превышать уровня 0,1 %. В противном случае топливо признается нестабильным. Метод дает достаточно точные результаты. Однако, он может быть использован только в лаборатории.

**Проверка топливных смесей на совместимость методом «пятна».** Метод «пятна» связан с оценкой свойств приготовленной смеси по внешнему виду пятна, полученного нанесением капли топлива на белую фильтровальную бумагу [5, 6]. Предварительно смесь нагревают до 60°C и выдерживают при этой температуре в течение 15–20 мин. После нанесения пипеткой порции (капли) смеси на поверхность белой фильтровальной бумаги уже

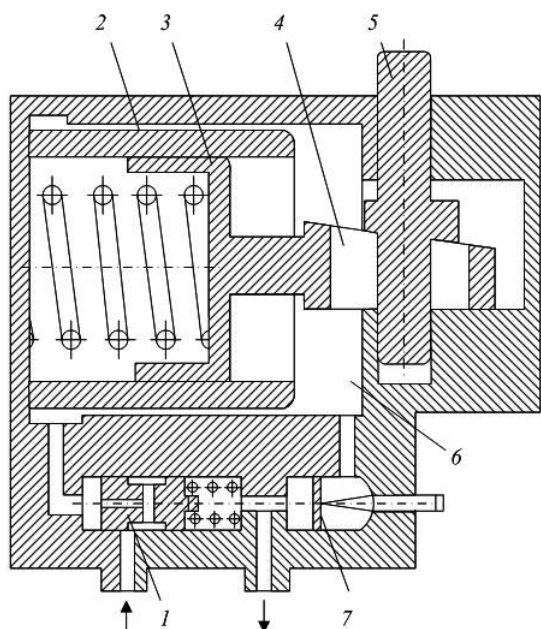


Рис. 2. Схема вязкостного корректора ЦНИТА:  
1 — клапан; 2 — концентрическая щель; 3 — поршень;  
4 — клиновой механизм; 5 — регулятор упора рейки;  
6 — междроссельная полость; 7 — отверстие с иглой

просохшее пятно сравнивают с эталонными пятнами. Пятна, имеющие более или менее однородную окраску, свидетельствуют о совместимости смеси.

Таким образом, стабильность смесей высоковязких моторных нефтяных топлив с маловязкими определяется, главным образом, групповым химическим составом исходных топлив [5]:

- смеси топлив, не содержащих асфальтенов, не подвержены расслоению и являются термодинамически устойчивыми системами;

- расслоение топливной смеси может быть следствием нарушения агрегативной устойчивости асфальтенов вследствие превышения десольватирующего действия алкано-циклановых углеводородов над сольватирующим действием смол и ароматических углеводородов;

- большей совместимостью отличаются вязкие ароматизированные смолистые и маловязкие топлива, содержащие минимальное количество алкано-циклановых углеводородов;

- стабильность смесей вязких топлив с маловязкими дистиллятными повышается с сокращением доли последних;

- с повышением температуры смешения совместимость топлив возрастает;

- на процессы коагуляции асфальтенов и седиментации образовавшейся гетерогенной фазы при смешении топлив, в зависимости от их химического группового состава и соотношения в смеси, обычно затрачивается от нескольких часов до нескольких суток;

- прекращения процесса коагуляции и повышения дисперсности асфальтенов можно достичь путем увеличения доли вязкого топлива в смеси и наоборот.

**Технические решения и рекомендации.** При переходе с одного вида топлива на другой изменение мощности дизеля при работе по внешней характеристике достигает 15–25 %. Для стабилизации характеристик применяют автоматические вязкост-

ные корректоры, обеспечивающие постоянство массовой цикловой подачи топлива при переходе с дизельного топлива на бензин, керосин или их смеси [4, 11].

На рис. 2 представлена схема вязкостного корректора конструкции ЦНИТА [12]. Для стабилизации характеристик при изменении давления в топливной системе на входе в корректор установлен клапан постоянного перепада 1. В качестве элемента, чувствительного к изменению вязкости, используется дроссель в виде концентрической щели, в которой обеспечивается ламинарный режим течения топлива. В другом дросселирующем элементе, выполненном в виде отверстия в тонкой пластинке 7 с регулирующей иглой, обеспечивается турбулентный режим течения в области автомодельности. Изменение давления топлива в междроссельной полости 6 вызывает перемещение поршня 3, связанного с клиновым механизмом 4 и узлом регулирования упора рейки топливного насоса 5. Давление топлива в междроссельной полости над поршнем уравнивается усилием пружины. Топливо для корректора отбирается из системы подачи топлива после фильтра, тонкой очистки и проходит последовательно через клапан постоянного перепада, концентрическую щель, междроссельную полость, дроссель с регулирующей иглой и далее сливается в бак.

При переходе на менее вязкое топливо (или при повышении температуры топлива) давление в междроссельной полости возрастает, поршень, сжимая пружину, перемещает клиновой механизм и упор рейки топливного насоса в положение увеличенной цикловой подачи соответственно с изменением вязкости.

Основные технические характеристики корректора ЦНИТА следующие [12]:

- давление топлива на входе — 0,27–0,45 МПа;
- максимальное перемещение упора рейки — 1,5 мм;
- рабочий диапазон температур топлива — 20–60 °С;
- вязкость топлива — 0,5–2 сСт;
- максимальный расход топлива через корректор — 18 л/ч.

Повысить стабильность топливных смесей можно следующими способами: использовать смеси оптимального компонентного состава; деасфальтировать исходное вязкое топливо; использовать стабилизирующие высокоароматизированные присадки; использовать высокоэффективные смеси-тели.

Для судовых условий наиболее приемлемое решение — установка высокоэффективных смесителей [2–5]. Выяснено, что лучший способ повышения стабильности топливных смесей — готовить их в условиях процесса кавитации потока.

Одним из самых перспективных и экологически чистых альтернативных топлив для дизелей является диметиловый эфир (ДМЭ) [1, 4, 5].

Наиболее сложной задачей при использовании ДМЭ и других маловязких топлив в дизелях является организация процесса топливоподачи таким образом, чтобы сохранялись проектные характеристики дизеля. В этом направлении использование смесей ДМЭ и стандартного дизельного топлива является перспективным направлением [1, 7].

Процесс подачи ДМЭ и образование смесового топлива осуществляется следующим образом (рис. 3): ДМЭ из бака подается к двигателю под давлением 1,0–1,5 МПа, создаваемым сжатым азотом. Надув

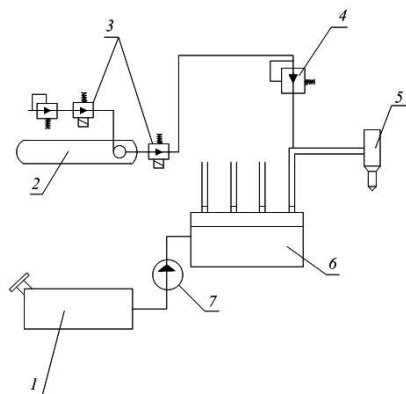


Рис. 3. Система смешения и подачи в дизельном двигателе дизельного топлива и диметилового эфира: 1 — бак дизельного топлива; 2 — баллон с ДМЭ; 3 — клапаны электромагнитные; 4 — клапан импульсной подпитки; 5 — форсунка дизельная; 6 — топливный насос высокого давления (ТНВД) для дизельного топлива; 7 — насос топливоподкачивающий дизельного топлива

баллона с ДМЭ азотом позволяет сохранить избыточное давление приблизительно на одном уровне в процессе потребления ДМЭ, исключить вероятность образования паровых пробок и прекращения работы дизеля.

В разработанной системе топливоподдачи ДМЭ, пройдя через электромагнитный клапан отсечки подачи, поступает к топливной рампе и к клапанам импульсной подпитки (КИП). Смешение ДМЭ с дизельным топливом осуществляется в КИП, через которые происходит многократное всасывание ДМЭ в трубопроводы высокого давления после закрытия иглы форсунки в условиях затухающего волнового процесса изменения давления топлива в трубопроводе. Схема подачи ДМЭ в линию высокого давления с помощью КИП была предложена и апробирована для широкого круга задач (в том числе для подачи сжиженных газов) профессором РУДН Патрахальцевым Н. Н. [4, 5]. Применительно к ДМЭ такая работа в МГТУ проводилась путем проведения расчетных и экспериментальных исследований (на безмоторном стенде).

Включение в топливоподающую систему клапана импульсной подачи позволяет демпфировать волновой процесс в нагнетательном трубопроводе (уменьшать амплитуду колебаний давления перед форсункой  $P_{форс}$ ).

Продолжая развитие многотопливных двигателей Continental LDS-427, AWDS-1790 и др. с М-процессом, американская фирма «Континенталь» применила автоматический компенсатор изменения максимальной мощности двигателя в зависимости от плотности (вязкости) топлива (рис. 4). Это позволяет обеспечить номинальную мощность двигателя при работе на любых топливах [3].

Топливо к компенсатору подается через канал 4 под давлением 1,8–4,0 кгс/см<sup>2</sup> от подкачивающего насоса, нагнетающего топливо одновременно и в топливный насос высокого давления. Имеющийся золотник 5 обеспечивает на всех режимах работы двигателя постоянное давление при данном сорте топлива. Топливо под постоянным давлением направляется через канал 3, щель 2 и отверстие 7. Сечение отверстия 7 с острыми краями можно регулировать конической иглой 8. Щель 2 — образованный между корпусом и поршнем зазор —

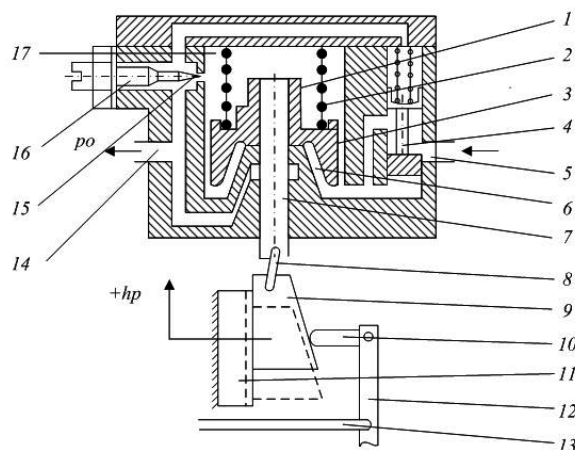


Рис. 4. Схема устройства компенсатора плотности топлива: 1 — рычаг; 2 — щель; 3, 4 и 10 — каналы; 5 — золотник; 6 — полость компенсатора; 7 — отверстие; 8 — игла; 9 — ограничитель; 11 — рейка

является чувствительным элементом к вязкости топлива. В зависимости от вязкости топлива в полости 6 устанавливается различное давление, в соответствии с этим меняется и положение штока, связанного с коническим ограничителем 9 рейки 11 топливного насоса через рычаг 1. Через канал 10 отводится топливо, просочившееся через неплотности штока поршня.

#### Выводы.

1. Опытная эксплуатация и проведенные эксперименты показали [1–3, 7–10], что весовая производительность топливной системы дизеля на сжиженном газе, ДМЭ, спиртах, бензинах, маловязких ГК и других легких топливах по сравнению с производительностью на дизельном топливе уменьшается в среднем до 50 %.

2. Для сохранения постоянной номинальной мощности серийного дизеля на топливах малой вязкости необходимо увеличить производительность топливного насоса высокого давления [1–3, 8] за счет его перерегулировки (увеличения угла опережения впрыска, снижения усилия затяга пружины форсунки, если имеется запас по активному ходу плунжера), или путем замены серийных плунжерных пар парами большего диаметра, значение которого можно определить соответствующим расчетом [10, 12–14].

3. При использовании в дизелях смесей легких и тяжелых топлив целесообразно применение эффективных схем смешения и устройств, корректирующих вязкость, плотность и сжимаемость топлива, с целью приближения названных параметров топлива к таковым для топлива по ГОСТ 305-82.

#### Библиографический список

1. Ведрученко, В. Р. Альтернативные виды топлива для судовых дизелей : моногр. [Текст] / В. Р. Ведрученко, И. И. Малахов. — Омск : Омский ин-т водного транспорта (филиал) НГАВТ, 2012. — 173 с.
2. Ведрученко, В. Р. О выборе схем и разработке технических решений систем топливоподдачи альтернативных и тяжелых топлив в дизелях. Ч. 1. [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов, М. В. Кульков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 2 (90). — С. 157–162.



3. Ведрученко, В. Р. О выборе схем и разработке технических решений систем топливоподачи альтернативных и тяжелых топлив в дизелях. Ч. 2. [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов, М. В. Кульков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 2 (90). — С. 138–143.

4. Селиверстов, В. М. Экономия топлива на речном флоте [Текст] / В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. — М.: Транспорт, 1983. — 231 с.

5. Возницкий, И. В. Практика использования морских топлив на судах: учеб. пособие [Текст] / И. В. Возницкий. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2005. — 124 с. — Сер. Библиотека судового механика.

6. Марков, С. В. Нефтяные топлива энергетических установок морских судов: учеб. пособие [Текст] / С. В. Марков, Н. А. Троеглазова. — Новороссийск: Изд-во ГМА, 2004. — 122 с.

7. Камкин, С. В. Эксплуатация судовых дизелей [Текст] / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М.: Транспорт, 1990. — 344 с.

8. Большаков, В. Ф. Подготовка топлив и масел [Текст] / В. Ф. Большаков, Л. Г. Гинзбург. — Л.: Судостроение, 1978. — 152 с.

9. Фомин, Ю. Я. Применение тяжелых топлив в судовых дизелях [Текст] / Ю. Я. Фомин, Э. М. Половинка, В. И. Шестопалов. — М.: Транспорт, 1971. — 192 с.

10. Семенов, Б. Л. Применение сжиженного газа в судовых дизелях [Текст] / Б. Л. Семенов. — Л.: Судостроение, 1969. — 176 с.

11. Зубрилов, С. П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах [Текст] / С. П. Зубрилов, В. М. Сели-

верстов, М. И. Браславский. — Л.: Судостроение, 1988. — 80 с.

12. Свиридов, Ю. Б. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей [Текст] / Ю. Б. Свиридов, Л. В. Малявинский, М. М. Вихерт. — Л.: Машиностроение, 1979. — 248 с.

13. Демьянов, Л. А. Многотопливные двигатели [Текст] / Л. А. Демьянов, С. К. Сарафанов. — М.: Воениздат, 1968. — 108 с.

14. Ведрученко, В. Р. Расчет процесса топливоподачи теплового дизеля на маловязких топливах [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов // Известия Транссиба. — 2015. — № 2. — С. 68–72.

**ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики.

**КРАЙНОВ Василий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

**КОКШАРОВ Максим Валерьевич**, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики.

**ЖДАНОВ Николай Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.

**ЛАЗАРЕВ Евгений Сергеевич**, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: [Heatmgups@mail.ru](mailto:Heatmgups@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 13.01.2016 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, М. В. Кокшаров, Н. В. Жданов, Е. С. Лазарев

## Книжная полка

**Гуревич, В. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса / В. Гуревич. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. — 302 с. — ISBN 978-5-9729-0104-3.**

В книге рассмотрены практические аспекты защиты электрооборудования подстанций на примере микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) и силовых трансформаторов от разрушительного воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва и других видов преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий, оборудование для производства которых интенсивно разрабатывают и совершенствуют в последние годы. Предложены различные технические решения и организационные мероприятия, направленные на повышение живучести подстанций.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся эксплуатацией электрооборудования на подстанциях, проектировщиков, производителей МУРЗ, руководителей отрасли, а также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов, специализирующихся в области электроэнергетики.

**Цуканов, В. Н. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство / В. Н. Цуканов, М. Я. Яковлев. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. — 305 с. — ISBN 978-5-9729-0078-7.**

Рассмотрена отечественная волоконно-оптическая компонентная база, предназначенная для жестких условий эксплуатации. Приведены основные технические характеристики, а также методы их измерения, оптических волокон, волоконно-оптических кабелей, оптических соединителей, объединителей, разветвителей, переключателей, пассивных и активных волоконно-оптических линий задержки, дискретных передающих и приемных оптоэлектронных модулей, оптических трансиверов и ретрансляторов.

Предложены методы контроля параметров безотказности волоконно-оптических компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронных компонентов.

Книга содержит практические рекомендации по построению традиционных и оригинальных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), оптических концентраторов, коммутаторов, медиаконверторов, автономных источников питания узлов подводных ВОСП, волоконно-оптических систем распределения СВЧ сигналов, волоконно-оптических фазовращателей, активных волоконно-оптических линий задержки, оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона, оптоэлектронных АЦП и ЦАП.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией волоконно-оптической техники.

## ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В ДИЗЕЛЯХ

Выполнен развернутый химмотологический анализ нефтяных топлив для дизелей широкого класса. Показано влияние свойств топлив на показатели работы дизеля в различных условиях эксплуатации. Обосновано применение топливных смесей из тяжелых и легких дизельных на базе статистической модели оценки совместимости разных сортов и марок нефтяного топлива. Приведены апробированные на практике и в опытах наиболее удачные технические и технологические решения проблемы топливоподготовки смесевых топлив как нефтяного происхождения, так и альтернативных (из ненефтяного сырья), позволяющие решать задачи уменьшения вредных выбросов при работе дизелей.

**Ключевые слова:** топливо, химмотология, топливные смеси, смесители, дизельные двигатели, альтернативное топливо.

**Введение.** В настоящее время в России ежегодно потребляется около 100 млн т моторных топлив, производимых из нефти. При этом транспорт является одним из основных потребителей нефтепродуктов и останется главным потребителем моторных топлив на период до 2040–2050 гг. [1–3]. В ближайшей перспективе ожидается увеличение потребления нефтепродуктов при примерно постоянных объемах их производства, нарастающий дефицит моторных топлив из нефти и дальнейшее загрязнение окружающей среды от работы ДВС [1, 2].

Эти факторы привели, с одной стороны, к необходимости реконструкции топливно-энергетического комплекса путем более глубокой переработки нефти, применения энергосберегающих технологий, перехода как на менее дорогостоящие виды топлив, так и на более экологически чистые возобновляемые. Поэтому одним из основных путей совершенствования двигателей внутреннего сгорания, остающихся основными потребителями нефтяных топлив, является их адаптация к работе на различных нетрадиционных топливах, к которым относят облегченные и утяжеленные нефтяные топлива, альтернативные (ненефтяные) топлива, а также смеси топлив с целью снижения эксплуатационных затрат [1–5]. С другой стороны, ужесточение экологических требований к дизельным двигателям вынуждает двигателестроительные компании всего мира искать все новые и новые технические решения, чтобы уложиться в утверждаемые нормативы.

Обеспечение экологических характеристик дизельных транспортных средств и их сохранение

в процессе эксплуатации напрямую зависят от применения высококачественных моторных топлив. Поэтому изготовители двигателей непосредственно обращаются к производителям топлив и принимают совместные программы, направленные на решение экологических проблем [6–9].

Принятие норм по токсичности выбросов Евро-3 и Евро-4 потребовало от производителей техники дальнейшего совершенствования как технологии топливоподготовки, так и конструкций дизельных двигателей.

**Химмотологический анализ топлива для дизелей.** Применяемые нефтяные топлива в зависимости от метода их получения подразделяют на два вида: дистиллятные и тяжелые. Дистиллятные топлива состоят из легких фракций, получаемых дистилляцией в установках по переработке нефти, характеризуются малой вязкостью  $\nu = 3–6 \text{ мм}^2/\text{с}$  и поэтому не нуждаются в подогреве перед подачей к двигателям или котлам. Тяжелые топлива представляют собой смеси, состоящие из остаточных продуктов переработки нефти и дистиллятов.

В зависимости от соотношения легких и тяжелых компонентов вязкость тяжелых топлив, как и другие их показатели, варьируется в широких пределах [10–12]. Качество топлив регламентируется государственными стандартами и техническими условиями.

Начавшийся ранее и все более распространяемый процесс вовлечения в производство топлив продуктов вторичной переработки нефти потребовал пересмотра действующих стандартов

и спецификаций, расширения предельных значений показателей качества и привлечения дополнительных показателей (таких, как содержание алюминия, стабильность и совместимость топлив и др.).

**Дистиллятные топлива.** В силу ограниченности ресурсов и высокой стоимости дистиллятов цена относящихся к классу дистиллятов дизельных топлив в России ориентировочно в 1,7 раза превышает стоимость тяжелых топлив [2, 4, 5]. Отечественная промышленность выпускает дизельные топлива в соответствии с ГОСТ 305-82 путем смешивания фракций прямой перегонки сернистых нефтей, прошедших гидроочистку и депарафинизацию, с каталитическим газойлем.

В качестве заменителя дизельного топлива на судах морского и речного флота [2, 3] используют газотурбинное топливо (ГОСТ 10433–75). Это топливо получают как побочный продукт процессов замедленного коксования при выработке нефтяного кокса, необходимого металлургической промышленности [2, 3].

Нефтяная промышленность поставляет на флот судовое маловязкое топливо, предназначенное для замены дизельного и газотурбинного топлив. Это топливо вырабатывают путем смешивания дистиллятов вторичных процессов (коксования, термического и каталитического крекинга) с дизельными фракциями с повышенным концом кипения, взятыми из атмосферной и вакуумной колонн.

**Тяжелые топлива.** Тяжелые топлива представляют собой смеси прямогонных, а в последние годы — крекинг-остатков с дистиллятами. По вязкости топлива подразделяют на два вида — средневязкие ( $v_{30}$  до 35 мм<sup>2</sup>/с) и высоковязкие ( $v_{30}$  > 35 мм<sup>2</sup>/с). Из отечественных топлив к средневязким принято относить моторное топливо ДТ (ГОСТ 1667-68) и флотский мазут Ф-5 (ГОСТ 10585-75), хотя верхний предел их вязкости превосходит 35 мм<sup>2</sup>/с.

Топливо ДТ представляет собой смесь мазута с дистиллятами вторичных процессов — каталитическим газойлем, крекинг-керосином, количество которых достигает 50–60 %. Флотский мазут марки Ф-5 обычно состоит из маловязкого мазута прямой перегонки (60–70 %), черного солярового масла (16–20 %) и крекинг-мазута (20–30 %). От топлива ДТ он отличается меньшим содержанием дистиллятных фракций и большим содержанием серы и золы.

**Средневязкие топлива** можно применять не только в главных мало- и среднеоборотных двигателях, но и в двигателях вспомогательных дизель-генераторов. При этом необходимы подогрев топлива в танках запаса (местный подогрев у приемного патрубка), в отстойных и расходных цистернах и перед двигателем и котлом, а также эффективная очистка.

**Высоковязкие топлива:** топочный мазут марки 40 или 40В (ГОСТ 10585-75) — представляет собой компаундированное прямогонное топливо вязкостью до 170 мм<sup>2</sup>/с при 50°C. Он обладает высокой температурой застывания (до 25°C) и высокой зольностью (до 0,12 %).

Мазут М40 является основным видом топлива для малооборотных дизелей при условии, что их система топливоподготовки оснащена эффективными средствами очистки и подогрева. Заменителем топочного мазута служит моторное топливо ДМ вязкостью не более 150 мм<sup>2</sup>/с, содержание серы не более 1,5 %, но зольность может достигать 0,15 % [2, 3].

Для высоковязких топлив характерны повышенное содержание ароматиков, смол, асфальтенов, а также серы, золы и механических примесей [2, 6, 10–12].

**Зарубежные топлива.** Зарубежными спецификациями предусматривается значительно более широкий ассортимент поставляемых на суда топлив. По современной классификация (Shell Marine Fuel Specifications) тяжелые топлива условно подразделяют на две группы: остаточные высоковязкие топлива вязкостью 420–700 мм<sup>2</sup>/с при 50°C (Marine Fuel Oil или Residual Fuel) и топлива, представляющие собой смеси, вязкость которых лежит в диапазоне 420–30 мм<sup>2</sup>/с (Thin Fuel Oil или Intermediate Fuel Oil) [2, 6, 7].

Нефтяной кризис, возникающий периодически, обычно вызывает резкое увеличение либо снижение стоимости нефти и нефтепродуктов. К 1980 г. цена на нефтепродукты на мировом рынке возросла в 10 раз и более, затем произошел некоторый спад, но, несмотря на это, стоимость топлив продолжает оставаться высокой, и, учитывая ограниченность мировых ресурсов нефти, нет оснований ожидать падения цен в будущем. Общая же тенденция сводится к увеличению цен, т.к. технология извлечения нефти из недр (особенно на шельфах морей) становится все более дорогостоящей [6, 10–12].

В России стоимость мазута марки 40 составляет до 60 % стоимости дизельного топлива марки Л (ГОСТ 305-82). Столь значительную разницу в ценах нельзя не учитывать при выборе сорта топлива для дизелей. Если исходить из экономических соображений, то предпочтение следует отдавать более дешевым сортам топлив, которые, однако, обладают худшими эксплуатационными свойствами. При подсчете суммарного экономического эффекта следует исходить из разности между выигрышем в стоимости израсходованного за определенный промежуток времени топлива и потерями в эксплуатационных расходах [1, 10, 11].

Нефтяное моторное топливо представляет собой сложную органическую смесь, содержащую, главным образом, парафиновые, нафтеновые и ароматические углеводороды. В тяжелых высоковязких топливах также содержится группа органических высокомолекулярных соединений, объединяемых под общим названием асфальто-смолистые вещества (АСВ), которые подразделяют на следующие группы: нейтральные смолы, асфальтены, карбены и карбоиды. Первые две группы — основные представители АСВ в тяжелых топливах, в то время как карбены и карбоиды практически в них отсутствуют.

Групповой химический состав моторных топлив в основном зависит от состава нефти, из которой выработан данный нефтепродукт [2, 3, 7].

Если для дизельных топлив необходимость в подогреве для снижения вязкости отпадает, то для тяжелых топлив предварительный подогрев в паровых или электрических подогревателях является обязательным условием их подготовки, так как только этим путем можно достигнуть требуемой меньшей вязкости. Влияние вязкости и сжимаемости на характеристику впрыска, в зависимости от конструкции топливной аппаратуры, различно, но во всех случаях оно в той или иной мере отражается на качестве распыливания и последующего сгорания топлива. Опытным путем установлено, что оптimum вязкости тяжелых топлив и топливных смесей для дизелей лежит в пределах до 12–20 мм<sup>2</sup>/с,

Свойства перспективных, стандартных и опытных топлив для дизелей

№ п/п	Марка топлива	Вязкость $\nu_{20}$ , мм <sup>2</sup> /с	Плотность $\rho_4^{20}$ , г/см <sup>3</sup>	Парафиновые (П), %	Нафтеновые (Н), %	Ароматические (А), %	Фракционный состав, °С		
							t <sub>10%</sub>	t <sub>50%</sub>	t <sub>90%</sub>
1	Топливо расширенного фракционного состава ТУ 38.401500-84	6,0	0,811	46,0	40,0	14,0	100	290	370
2	Топливо утяжеленного фракционного состава (УФС), ТУ 38.001355-86	6,5	0,840	40,0	42,0	18,0	190	290	380
3	Топливо широкого фракционного состава (ШФС)	5,5	0,790	39,2	42,8	18,0	110	250	340
4	Топливо моторной марки ДТ, ГОСТ 1667-68	4,4	0,930	38,0	36,0	26,0	255	355	460
5	Топливо газотурбинное (ТГВК), ГОСТ 10433-82	3,6	0,860	39,0	39,0	32,0	210	290	360
6	Топливо дизельное марки «З», ГОСТ 305-82	4,5	0,820	43,4	35,3	21,3	190	280	340
7	Топливо дизельное марки «Л», ГОСТ 305-82	6,0	0,835	41,0	40,0	19,0	180	250	360
8	Синтетическое жидкое дизельное топливо (СЖТ) из углей	6,2	0,842	33,4	26,4	40,2	196	252	315
9	Топливо судовое маловязкое (СМТ), ТУ 38.101567-87	11,4	0,890	32,4	38,8	28,8	240	345	400
10	Опытное № 1 СМТ (БашНИИ НП)	4,8	0,845	32,4	30,5	28,9	205	285	355
11	Опытное № 2 СМТ (БашНИИ НП)	2,8	0,812	48,2	30,5	11,3	110	295	360
12	Опытное № 3 СМТ (БашНИИ НП)	9,2	0,880	22,8	27,1	50,1	255	350	380
13	Опытное № 4 СМТ (БашНИИ НП)	5,5	0,838	34,8	24,0	41,2	120	245	335
14	Газовый конденсат (ГК) (Вултыкское месторождение)	1,7	0,730	70	18	12	70	147	350
15	Газовый конденсат (ГК) (Оренбургское месторождение)	1,2	0,740	70	20	10	40	85	200

для форсунок котлов может быть допущена вязкость 20–26 мм<sup>2</sup>/с.

**Стабильность топливных смесей.** В связи с тем что основную часть нефти добывают в восточных районах России и для нее характерно повышенное содержание асфальтенов (до 6 %) и смолистых веществ, поставляемые в настоящее время вязкие топлива содержат до 25 % смолисто-асфальтеновых углеводородов, и их влиянием на стабильность топливной смеси пренебрегать нельзя [3, 6, 10, 11]. Чтобы оценить стабильность топливной смеси из нефтяных топлив, необходимы данные взаимной растворимости групп углеводородов жидких топлив: парафиновых, ароматических смол, асфальтенов. Наиболее изучены углеводороды первых трех групп [11].

Термодинамический анализ имеющихся данных по растворимости для целого ряда бинарных систем типа парафиновые – нафтеновые, парафиновые – ароматические, нафтеновые – ароматические, позволил установить, что смеси топлив, содержащие только указанные группы углеводородов, образуют стабильные смеси, не расслаивающиеся при хранении [3, 11].

При смешении вязкого топлива, в состав которого входят асфальтены, с маловязким топливом, содержащим значительное количество парафинонафтеновых углеводородов, уменьшаются толщины адсорбированного слоя вокруг частиц асфальтенов и при их столкновении происходит коагуляция, которая обуславливает расслоение топливной смеси.

Проведенные П. Д. Семеновым [3] исследования по равновесному состоянию смесей различных дизельных топлив с вязкими при различном долевом содержании и различных температурных режимах показали, что стабильность смесей зависит в первую очередь от соотношения в исходных топливах, с одной стороны, асфальтенов, смол и ароматиков, а с другой — парафиновых и нафтеновых углеводородов.

Обработка опытных данных по методу избыточных термодинамических функций позволила установить, что для оценки стабильности топливных смесей различных топлив можно использовать коэффициент совместимости [3, 4]:

$$K_c = \frac{A \cdot C \cdot m_1 \cdot (T_1/T_0)^{2,1T_1/T_0}}{(П + Н) \cdot \Phi \cdot m_2},$$



где  $A$  — содержание в смеси ароматических углеводородов, %;  $C$  — содержание смол, %;  $m_1$  и  $m_2$  — молекулярная масса соответственно маловязкого и вязкого топлив, кг/моль;  $T_1$  — температура смешения, К;  $T_0$  — стандартная температура, равная 293 К;  $P+N$  — суммарное содержание в смеси парафино-нафтеновых углеводородов, %;  $\Phi$  — содержание в смеси асфальтенов, %.

В связи с изложенным можно заключить, что расслоение топливной смеси представляет собой ряд процессов: нарушение агрегатной устойчивости асфальтенов, сближение их частиц; коагуляция асфальтенов; седиментация асфальтенов с вовлечением в осадок смол и полициклической ароматики. Таким образом, стабильность топливной смеси полностью определяют асфальтены (их наличие или отсутствие). При их отсутствии смесь будет стабильной.

В зависимости от углеводородного состава исходных топлив и их долевого содержания смесь при хранении может быть в стабильном, метастабильном и нестабильном состояниях. Для стабильных смесей  $K_c > 1,1$ . Такие смеси не расслаиваются при хранении.

При метастабильном состоянии смеси ( $0,82 < K_c < 1,1$ ) характерном через 2–3 сут. после смешения, по всему объему происходит образование дисперсной фазы в результате частичной коагуляции асфальтенов. При этом размер дисперсных частиц не превышает 6–8 мкм и они практически не оседают. Использование метастабильных смесей может уменьшить сроки очистки фильтроэлементов на 40–60 %.

При  $K_c < 0,82$  смеси топлив нестабильны. При их хранении возможно расслоение смеси. Размер частиц в нестабильных топливных смесях достигает 120 мкм.

У максимального числа частиц образующейся дисперсной фазы размеры 12–25 мкм. Использование нестабильных топливных смесей приводит к потере топлива в запасных и расходных цистернах; время работы фильтров до очистки уменьшается в 3–8 раз, отрицательно сказывается на работе топливных насосов и форсунок.

Установлено, что с увеличением в смеси доли тяжелого топлива ее стабильность повышается. Для смеси дизельного и моторного топлив наименее стабильны смеси с содержанием 15–25 % топлива ДТ [2, 3]. Это объясняется тем, что увеличение доли вязкого топлива стабилизирует асфальтены благодаря введению избытка смол и ароматических углеводородов [3].

В табл. 1 представлены сформированные нами данные по свойствам ряда топлив для дизельных двигателей. В данной таблице нами обобщены физические свойства, групповой и фракционный составы, что позволяет расчетом определять коэффициент совместимости разных сортов и марок топлива для приготовления смесей как с целью снижения затрат на топливо, так и уменьшения токсичности отработавших газов дизелей при использовании смесей тяжелых и легких (экологически более чистых) топлив.

**Выводы.** 1. Опытная эксплуатация и проведенные эксперименты показали [1–3, 6, 7, 11, 12], что весовая производительность топливной системы дизеля на сжиженном газе, ДМЭ, спиртах, бензинах, маловязких ГК и других легких топливах по сравнению с производительностью на дизельном топливе уменьшается в среднем до 50 %.

2. Для сохранения постоянной номинальной мощности серийного дизеля на топливах малой вязкости необходимо увеличить производительность топливного насоса высокого давления [1–3, 12] за счет его перерегулировки (увеличения угла опережения впрыска, снижения усилия затяга пружины форсунки, если имеется запас по активному ходу плунжера) или путем замены серийных плунжерных пар парами большего диаметра, значение которого можно определить соответствующим расчетом [13–16].

3. Использование в дизелях смесей легких и тяжелых топлив (без дополнительных регулировок топливной аппаратуры) возможно при сохранении вязкости смеси в пределах ее значений для топлив по ГОСТ 305-82.

#### Библиографический список

1. Работа дизелей на нетрадиционных топливах [Текст] / В. А. Марков [и др.]. — М. : Изд-во Легион-Автодата, 2008. — 464 с.
2. Топлива и топливные системы судовых дизелей [Текст] / Ю. А. Пахомов [и др.]. — М. : Транслит, 2007. — 496 с.
3. Селиверстов, В. М. Экономия топлива на речном флоте [Текст] / В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. — М. : Транспорт, 1983. — 231 с.
4. Ведрученко, В. Р. О выборе схем и разработке технических решений систем топливоподачи альтернативных и тяжелых топлив в дизелях. В 2 ч. Ч. 1. [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов, М. В. Кульков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 2 (90). — С. 157–162.
5. Ведрученко, В. Р. О выборе схем и разработке технических решений систем топливоподачи альтернативных и тяжелых топлив в дизелях. В 2 ч. Ч. 2. [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов, М. В. Кульков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 3 (93). — С. 138–143.
6. Большаков, В. Ф. Подготовка топлив и масел [Текст] / В. Ф. Большаков, Л. Г. Гинзбург. — Л. : Судостроение, 1978. — 152 с.
7. Фомин, Ю. Я. Применение тяжелых топлив в судовых дизелях [Текст] / Ю. Я. Фомин, Э. М. Половинка, В. И. Шестопалов. — М. : Транспорт, 1971. — 192 с.
8. Зубрилов, С. П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах [Текст] / С. П. Зубрилов, В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. — Л. : Судостроение, 1988. — 80 с.
9. Демьянов, А. А. Многотопливные двигатели [Текст] / Л. А. Демьянов, С. К. Сарафанов. — М. : Воениздат, 1968. — 108 с.
10. Возницкий, И. В. Практика использования морских топлив на судах : учеб. пособие [Текст] / И. В. Возницкий. — СПб. : Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2005. — 124 с. — (Библиотека судового механика).
11. Марков, С. В. Нефтяные топлива энергетических установок морских судов : учеб. пособие [Текст] / С. В. Марков, Н. А. Троеглазова. — Новороссийск : Изд-во ГМА, 2004. — 122 с.
12. Камкин, С. В. Эксплуатация судовых дизелей [Текст] / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М. : Транспорт, 1990. — 344 с.
13. Свиридов, Ю. Б. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей [Текст] / Ю. Б. Свиридов, Л. В. Малявинский, М. М. Вихерт. — Л. : Машиностроение, 1979. — 248 с.
14. Ведрученко, В. Р. Альтернативные виды топлива для судовых дизелей : моногр. [Текст] / В. Р. Ведрученко, И. И. Малахов. — Омск : Омский ин-т водного транспорта (филиал) НГАВТ, 2012. — 173 с.

15. Семенов, Б. Л. Применение сжиженного газа в судовых дизелях [Текст] / Б. Н. Семенов. — Л. : Судостроение, 1969. — 176 с.

16. Ведрученко, В. Р. О расчете процесса топливоподачи тепловозного дизеля на маловязких топливах [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов // Известия Транссиба. — 2015. — № 2. — С. 68–72.

**ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики.

**КРАЙНОВ Василий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

**КОКШАРОВ Максим Валерьевич**, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики.

**ЖДАНОВ Николай Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.

**ЛАЗАРЕВ Евгений Сергеевич**, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: Incoe@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2015 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, М. В. Кокшаров, Н. В. Жданов, Е. С. Лазарев

УДК 621.3

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

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

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТЛЫХ И ТЕМНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ПИТАНИЕМ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Исследованы факторы, определяющие выбор эффективных режимов работы электротехнологических установок инфракрасного нагрева со светлыми и темными излучателями и показана эффективность применения тока сложной формы для их питания.

**Ключевые слова:** инфракрасный излучатель, электрический режим, потребляемая мощность, ток сложной формы.

Инфракрасные (ИК) излучатели применяются не только для обогрева помещений, но и в промышленных низкотемпературных электрических печах сопротивления для термообработки и сушки. Например, инфракрасные туннельные и шахтные печи используют темные инфракрасные излучатели — это основные элементы линии термической вулканизации кабельных покрытий, сушки и оплавления полимерных трубок, устройств разогрева труб перед термоформованием. В электронагревателях инфракрасных туннельных (ЭНТ) осуществляется непрерывный разогрев наружной поверхности трубчатых полимерных материалов с помощью направленного инфракрасного излучения заданного диапазона длин волн. Их основными элементами являются темные излучатели серий ИКН-100, ИКН-200, ИКН-300, которые выполнены из высокоглиноземистых шамотов с содержанием оксида — 72 %. Излучатели выпускаются обычного исполнения (1) и с встроенным датчиком температуры излучающей поверхности (2). Термодатчик ТХА — это хромель-алюмелевый преобразователь типа «К»

(NiCr—NiAl) с контактными выводами. Темные ИК-излучатели — керамические нагревательные элементы серии ИКН-100 имеют вогнутую излучающую поверхность, серии ИКН-200 — плоскую, ИКН-300 — внутреннюю теплоизоляцию и плоскую излучающую поверхность. Диапазон мощностей ИКН-100, ИКН-300 составляет 250÷1000 Вт, а ИКН-200 — 60÷250 Вт. Эти излучатели обеспечивают равномерную температуру поверхности излучения и равномерный лучистый обогрев. Все излучатели ИКН покрыты глухой матовой ангобированной керамической глазурью на основе оксида циркония, которая не чувствительна к пыли и органическим загрязнениям, а также к влажности. Выпускают установки ЭИТ с плотно установленными темными ИК-излучателями и зональным расположением обогревателей. Для создания терморезонансного эффекта перераспределения и выравнивания удельной инфракрасной мощности излучения на поверхности материала внутри установки ЭИТ размещают специальные рефлекторы-отражатели из полированной нержавеющей стали.

Важной интегральной характеристикой работы излучателей является энергия излучения, которая учитывает энергию излучения всех волн диапазона, поскольку зависит и от длины волны и от температуры излучающей поверхности [1–6].

Наряду с темными ИК-излучателями используют устройства со светлыми ИК-излучателями в виде ламп с вольфрамовой нитью (температура нити накала 2200 °С) и с внутренним зеркалом-отражателем или в виде трубки из кварцевого стекла с нитью накала. Основная часть энергии в светлых излучателях приходится на длины волн в диапазоне 0,8–3,5 мкм, а максимум излучения наблюдается при длине волны  $\lambda=1,3$  мкм. В темных излучателях — спектр излучения соответствует диапазону  $\lambda=2\div5$  мкм. Пик интенсивности излучения приходится на диапазон 1,5–6 мкм, что является оптимальным для процесса инфракрасного обогрева и сушки. Спектр излучения обоих типов излучателей непрерывный, характерный для твердых веществ [1–6].

Повышение энергетической эффективности работы установок с темными и светлыми ИК-излучателями является актуальным по настоящее время. Улучшение качества изделий и увеличение сроков службы зависят, в том числе, и от электрических режимов работы темных и светлых ИК-излучателей.

В работах авторов [3–5] показано, что в электролизных и плавильных электротехнологических установках (ЭТУ) для повышения энергетической эффективности целесообразно применять ток сложной формы (ТСФ), т.е. ток полигармонического состава с частотами гармоник в диапазоне  $10^2\div10^3$  Гц.

Оптимальный состав гармоник определяется физическими и химическими процессами, протекающими при электролизе и в электрической дуге.

Регулирование спектра частот питающего напряжения и, следовательно, состава (формы) ТСФ может быть реализовано с использованием управляемых полупроводниковых приборов (тиристоров) или нелинейных индуктивностей (дресселей).

Применение ТСФ для питания ИК-излучателей позволяет повысить их энергетические показатели, так как при этом возрастает поток излучения при том же потреблении электроэнергии от сети, что определяется физическим эффектом воздействия электромагнитного поля повышенной частоты на молекулы и атомы материала излучателя. Этот эффект ранее был отмечен рядом исследователей, например, профессором Г. Н. Рохлиным [2–7].

**Целью** данной работы является экспериментальное исследование влияния параметров электрических режимов (обычного и с питанием током сложной формы) на процессы в темных и светлых ИК-излучателях и определение энергетической эффективности применения ТСФ в установках инфракрасного нагрева.

**Используемые приборы.** Исследование изменения спектра излучения ИК-излучателя выполнены с использованием следующего измерительного комплекса:

- высокочувствительный оптоволоконный спектрометр с ультрафиолетовым рассеянием света AvaSpec-ULS 2048-USB2, в комплекте которого предусмотрено универсальное программное обеспечение AvaSoft-ALL [1–6];

- для измерения температуры поверхности излучения использована термопара ТХА, встроенная в темный керамический ИК-излучатель ИКН-200 [1–6].

- для измерения электрических параметров установки использован анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060. В экспериментах определяли среднеквадратичные значения токов, напряжений, активной, реактивной, полной мощности, значение коэффициента мощности в сети [1–6].

Для выполнения экспериментов также была разработана методика исследований.

**Первая серия экспериментов** выполнена на физической модели ЭТУ для исследования скорости возрастания температуры на поверхности темного ИК-излучателя типа ИКН-203, а также установившихся значений температуры в сравнении обычного режима при питании переменным током (напряжением) частотой 50 Гц и нового при питании ТСФ. В экспериментах использован излучатель инфракрасный керамический типа ИКН-203-0,1/230-2, мощностью 100 Вт, с плоской излучающей поверхностью размером 60x60 мм и встроенной термопарой ТХА (табл. 1). Физическая модель промышленной ЭТУ содержала однофазный трансформатор 220/110 В, темный ИК-излучатель со встроенной термопарой и дроссель насыщения (ДН). В обычном и новом режимах напряжение на ИК-излучателе составляло 120 В. Регулирование формы тока (напряжения) в новом режиме осуществлялось ДН. В обычном режиме дроссель не использовался.

Значения составляющих мощности, измеренные со стороны первичной обмотки трансформатора **в обычном режиме**, составили: активная мощность  $P = 0,056$  кВт,  $S$  — полная мощность — 0,152 кВА,  $Q$  — реактивная мощность — 0,141 квар, коэффициент мощности установки — 0,368. **В новом режиме** с питанием ТСФ составляющие мощности, измеренные со стороны первичной обмотки трансформатора были равны: активная мощность  $P = 0,045$  кВт,  $S$  — полная мощность — 0,055 кВА,  $Q$  — реактивная мощность — 0,031 квар, коэффициент мощности установки — 0,82.

Экспериментально установлено, что совершенствование электрического режима ЭТУ за счет применения ТСФ увеличивает скорость подъема температуры, а также температуру излучающей поверхности в установившемся режиме (98 °С и 105 °С), что обуславливает увеличение интегральной характеристики — энергии излучения темного ИК-излучателя. О повышении эффективности установки в режиме с питанием ТСФ свидетельствует

Таблица 1

Обычный режим		Новый режим	
Время, мин	Температура, °С	Время, мин	Температура, °С
0	23	0	23
1	28	1	28
2	36	2	40
3	45	3	51
4	52	4	60
5	59	5	67
6	65	6	74
7	69	7	80
8	74	8	85
9	77	9	89
10	81	10	91
15	93	15	102
20	98	20	105

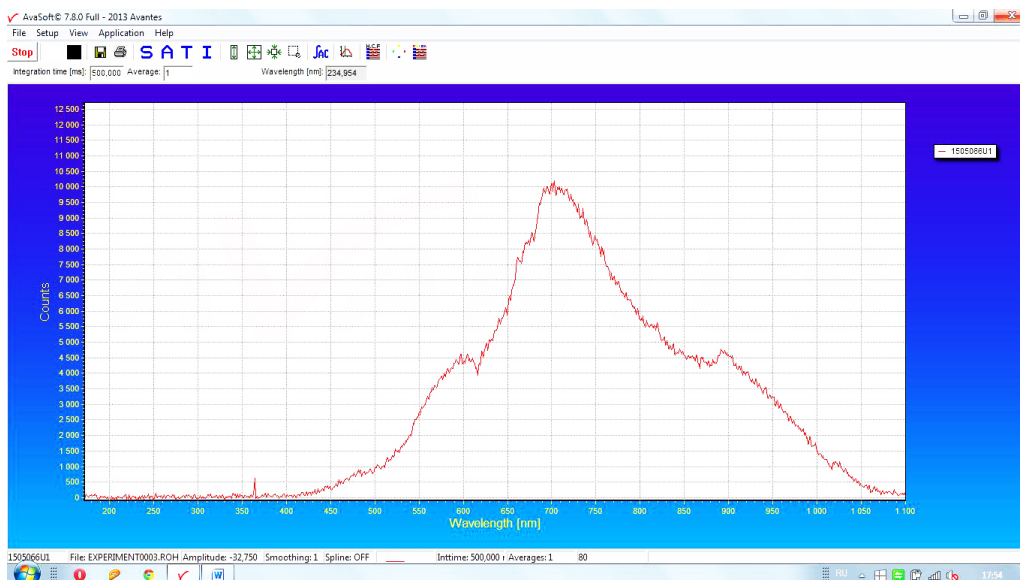


Рис. 1. Спектр излучения светлого ИК-излучателя мощностью 100 Вт в обычном режиме при напряжении 110 В

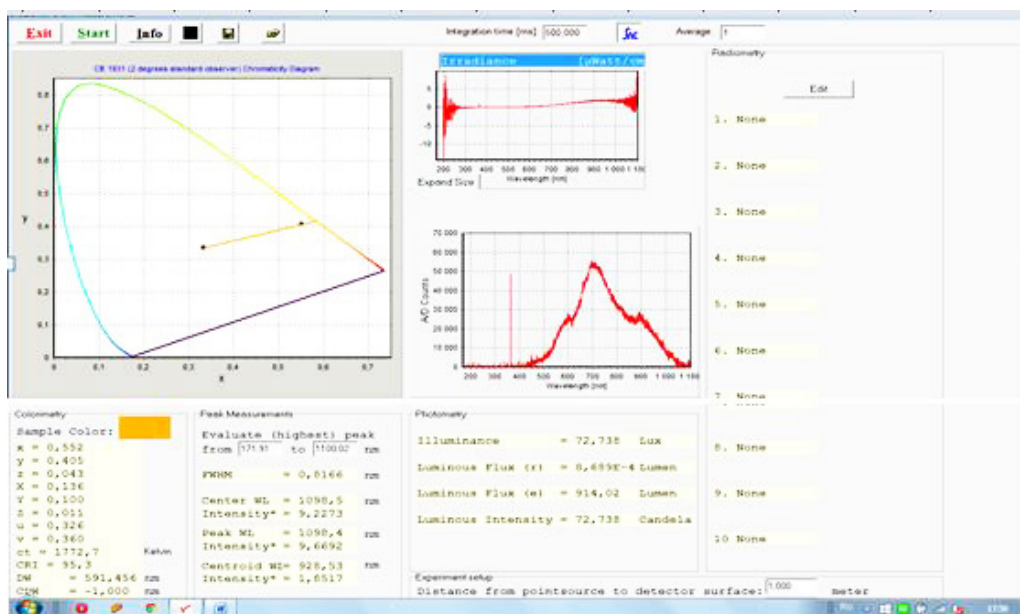


Рис. 2. Окно цветовой диаграммы для светлого ИК-излучателя мощностью 100 Вт при напряжении 110 В в обычном режиме: хроматические координаты, график поверхностной плотности потока излучения — и его наибольшее значение,  $2,0 \text{ мкВт/см}^2$  и график данных А/Д счета, интегральные параметры

также значение КПД установки, как отношение температуры ИК-излучателя в установившемся режиме к потребляемой из сети мощности, кВт. В новом режиме установка работает с более высоким значением коэффициента мощности 0,82 против 0,368 в обычном режиме.

В [7, 8] исследовано распределение энергии излучения по длинам волн при отклонениях напряжения в сети и соответственно напряжения на ИК-излучателе. В качестве объекта исследования выбраны светлые ИК-излучатели (мощностью 40÷100 Вт), номинальное напряжение 12,0 и 220,0 В. Результаты опытов для ИК-излучателя мощностью 100 Вт при работе в обычном режиме и для излу-

теля мощностью 40 Вт при работе в новом режиме с питанием ТСФ.

Экспериментально установлено, что при увеличении мощности ИК-излучателя от 40 до 100 Вт характер спектральной зависимости излучения имеет наибольшую интенсивность для длины волны 700÷800 нм. При регулировании напряжения характер спектра для излучателей мощностью 40 и 100 Вт различен. Для излучателя мощностью 40 Вт отмечены максимумы в спектре на длинах волн 500, 620 и 700 нм. Для излучателя мощностью 100 Вт, при регулировании напряжения от 50 до 250 В, максимумы имели место при длинах волн 550, 600, 700, 900 нм. Однако по мере уменьшения напря-



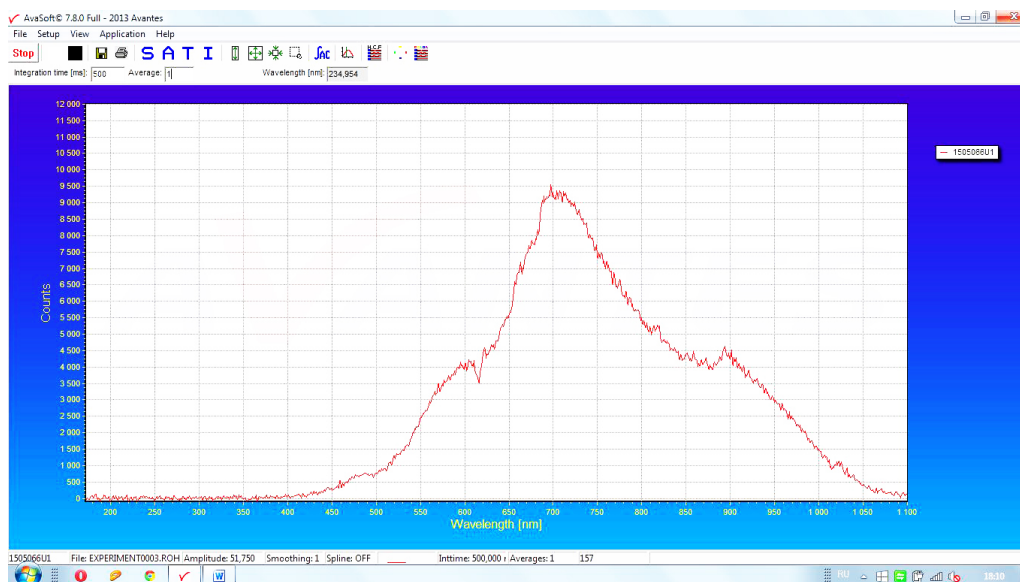


Рис. 3. Спектр излучения светлого ИК-излучателя мощностью 100 Вт в новом режиме при напряжении 110 В

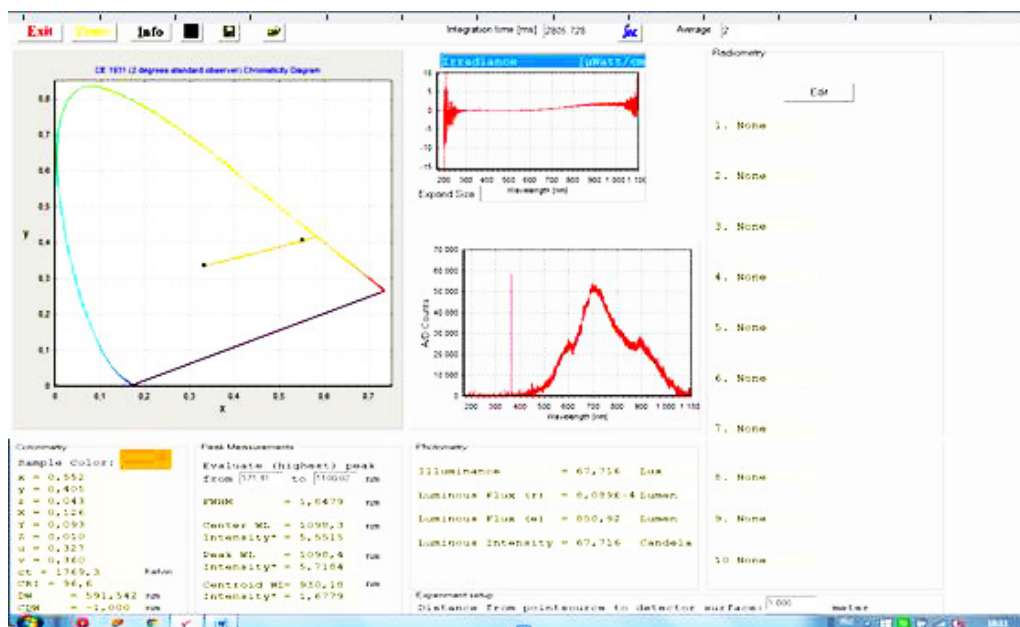


Рис. 4. Окно цветовой диаграммы для светлого ИК-излучателя мощностью 100 Вт при напряжении 110 В в новом режиме: хроматические координаты, график поверхностной плотности потока излучения и его наибольшее значение 2,0 мкВт/см<sup>2</sup> и график данных A/D счета, интегральные параметры

жения на излучателе отмечено сужение диапазона излучаемых волн и соответствующее сглаживание и исчезновение пиков излучения для длин волн 550, 600, 900 нм. Диапазон длин волн для соответствующих значений напряжения на ИК-излучателе следующий: при 250 В — [400÷1030 нм]; при 200 В — [420÷1015 нм]; при 150 В — [450÷1000 нм]; при 100 — [500÷990 нм]; при 50 В — [625÷800 нм]. При регулировании напряжения интенсивность излучения для волны 700 нм соответственно составило 1138, 540, 240, 225 и 30 [6–8].

В опытах измеряли интегральную характеристику: величину поверхностной плотности потока излучения, мкВт/см<sup>2</sup>. В обычном режиме при питании

переменным током частотой 50 Гц и при регулировании напряжения от 250 до 50 В поверхностная плотность потока излучения изменялась в диапазоне 20,0±0,5 мкВт/см<sup>2</sup>/нм. По результатам измерений спектров получены цветковые диаграммы.

**Вторая серия экспериментов.** Опыты проведены для определения распределения энергии излучения по длинам волн при регулировании формы питающего напряжения на светлом ИК-излучателе. Схема экспериментальной установки включала однофазный трансформатор 220/110 В, ДН для регулирования формы тока (напряжения), светлый ИК-излучатель. В качестве объекта исследования выбран светлый ИК-излучатель мощностью 100 Вт,

номинальное напряжение 220 В [2–4, 7]. Исследования проведены в сравнении обычного режима при питании от сети переменного тока частотой 50 Гц и нового — с питанием ТСФ. На рис. 1, 2 представлены для обычного режима спектр и окно цветовой диаграммы для излучателя мощностью 100 Вт при напряжении 110 В. На первом графике — на цветовой диаграмме определены хроматические координаты  $S(x)$ ,  $S(y)$ ,  $S(z)$ . Температура излучателя составила 1772 °К.

На втором графике (рис. 2) изображено изменение интегрального параметра — поверхностной плотности потока излучения в функции длины волны. Область длин волн — это спектральный диапазон, по которому выбранные радиометрические параметры интегрируются. Значение этого параметра составило 2,0 мкВт/см<sup>2</sup>.

Третий график (рис. 2) — это график счета. Он показывает необработанные данные А/Д счета (АЦП), поступающие со спектрометра. Этот график используется для определения оптимального времени интегрирования [6].

Значения составляющих мощности, измеренные со стороны первичной обмотки трансформатора **в обычном режиме**: активная мощность  $P$  — 0,052 кВт,  $S$  — полная мощность — 0,105 кВА,  $Q$  — реактивная мощность — 0,091 квар, коэффициент мощности установки  $\cos \varphi$  — 0,495.

Результаты исследования ИК-излучателя мощностью 100 Вт в новом режиме с питанием ТСФ при напряжении 110 В представлены на рис. 3 и 4. Плотность потока излучения составила 2,0 мкВт/см<sup>2</sup>, температура излучателя — 1769 °К.

Значения составляющих мощности, измеренные со стороны первичной обмотки трансформатора **в новом режиме**, соответственно были равны: активная мощность  $P$  — 0,045 кВт,  $S$  — полная мощность — 0,051 кВА,  $Q$  — реактивная мощность — 0,02 квар, коэффициент мощности установки — 0,88.

Следовательно, используя понятие кпд установки, как отношение плотности потока излучения от светлого ИК-излучателя к мощности, потребляемой установкой из сети, получаем значение этой величины для обычного режима при напряжении 110 В равное 19,0 %, а для нового режима с питанием ТСФ при том же напряжении — 39,0 %. Это свидетельствует о повышении эффективности установки за счет совершенствования электрического режима на основе применения ТСФ.

**Выводы.** Повышение эффективности установок со светлыми и темными ИК-излучателями возможно за счет совершенствования электрического режима на основе применения ТСФ, что обеспечивает работу ЭТУ с более высоким значением кпд установки и коэффициентом мощности при снижении потребляемой из сети мощности, при более равномерном спектре излучения, при расширении диапазона излучаемых длин волн в видимой и инфракрасной областях, при снижении температуры излучателя.

#### Библиографический список

1. Электротехнологические промышленные установки : учеб. для вузов [Текст] / 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 [Текст] / 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. [Текст] / 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 [Текст] / 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» [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.avantes.ru/>. — Загл. с экрана (дата обращения: 28.10.15).
6. Официальный сайт фирмы «НОМАКОН» [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://homacoh.ru/production/izluchateli-infrokranue/own/>. — Загл. с экрана (дата обращения: 28.10.15).
7. Птицына, Е. В. Экспериментальное определение влияния формы тока на характеристики излучателей [Текст] / Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин // Энерго- и ресурсосбережение XXI век : сб. матер. IX Междунар. науч.-практ. интернет-конф., март–июнь. — Орел, 2011. — С. 163–165.
8. 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: [fcdimon@ostu.ru](mailto:fcdimon@ostu.ru)

**КУВАЛДИН Александр Борисович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Автоматизированных электротехнологических установок и систем» 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 28.10.15 г.

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

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТЫ КОЛЕЦ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ

В данной статье пойдет речь о принципиально новом инерционно-вакуумном золоуловителе. Изменения его параметров приводят к значительным ухудшениям показателя эффективности газоочистного оборудования. Авторами исследуется влияние высоты колец на эффективность инерционно-вакуумного золоуловителя. Результаты и выводы численного эксперимента содержатся в конце статьи. Работа ведется при поддержке фонда «Энергия без границ».

**Ключевые слова:** золоулавливание, золоуловитель, зола, эффективность, энергетика, вспомогательное оборудование электростанций.

ИВЗ (инерционно-вакуумный золоуловитель) [1] — это новый вид газоочистного оборудования, который близок по своей конфигурации к циклону, но при этом по принципу своей работы кардинально отличается. ИВЗ оснащён дополнительными конфузорными и диффузорными участками, рассекателем и кольцами (которые принято далее называть «сомбреро») (рис. 1).

Одним из принципиальных отличий от циклона является направление потока газов (рис. 2).

При проведении расчетов была выбрана к-ε модель турбулентности.

При описании процесса течения использовались классические уравнения гидродинамики:

Уравнение неразрывности [2]:

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

Уравнения движения:

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

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

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

Уравнения к-ε модели:

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

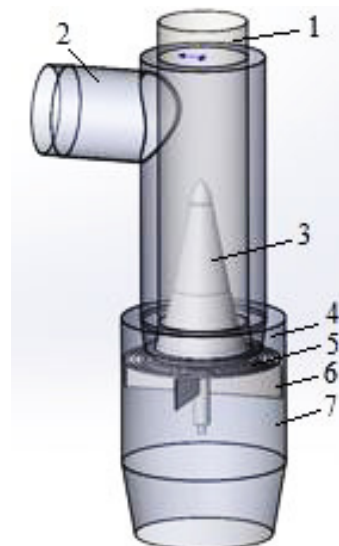


Рис. 1. Инерционно-вакуумный золоуловитель:  
1 — входной патрубок, 2 — выходной патрубок,  
3 — рассекатель, 4 — элемент «уши», 5 — кольца,  
6 — крестовина, 7 — бункер для золы

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

Уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

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

В численном эксперименте использовалось уравнение, которым описывается движение частиц [3]. Влияние частиц на поток будет минимальным

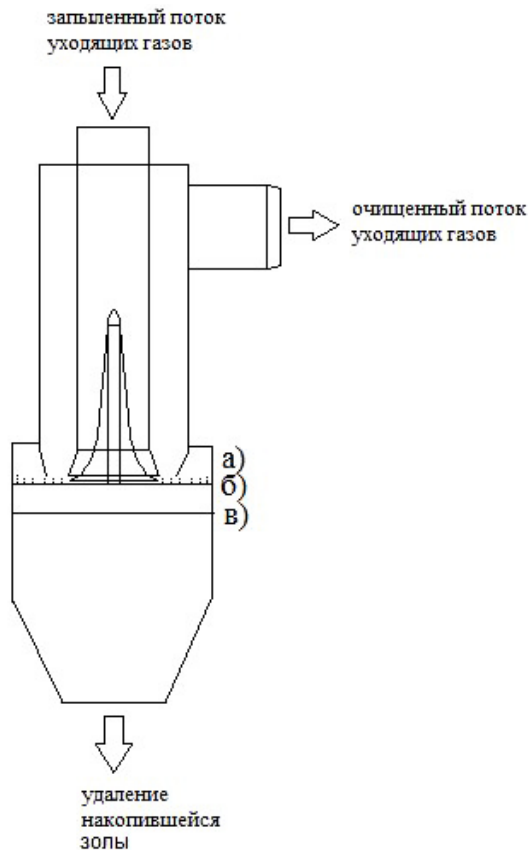


Рис. 2. Направление движения уходящих газов в ИВЗ

из условия, что поток является слабозапыленным ( $70 \text{ мг/м}^3$  на  $150000 \text{ м}^3/\text{ч}$  расхода уходящих газов). Силы, влияющие 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 (центростремительная 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 движении 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 частицы. Этот термин не применяется в CFX. Равна нулю в данном расчете.

Граничные условия приняты: на входе — давление в  $100000 \text{ Па}$ , давление на выходе в  $99000 \text{ Па}$  [4]. При расчете были учтены силы земного тяготения,

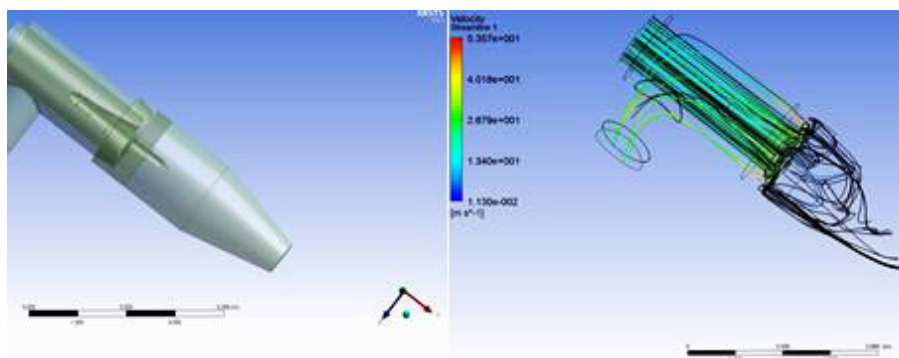


Рис. 3. Эксперимент проведен с установкой без колец

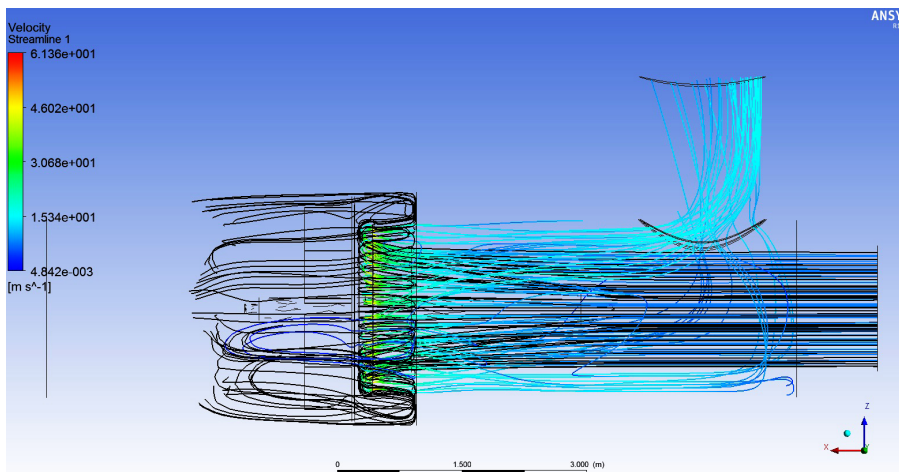


Рис. 4. Эксперимент проведен с наличием «сомбреро»



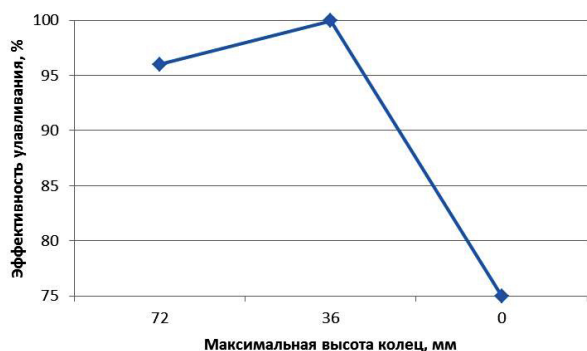


Рис. 5. Графическое представление зависимости эффективности установки от изменения высоты колец

Таблица 1

Влияние высоты колец на эффективность улавливания установки

Изменение длины, мм	Эффективность улавливания, %
72 (максимальная высота колец) (а)	96
36 (максимальная высота кольца) (б)	99,95
0 (кольца отсутствуют) (в)	75

а также учитывалось слабое влияние частиц на движение потока, частицы диаметром от 1 мкм — 40 мкм. Особенностью этой установки также можно обозначить то, что она может работать при минимальном для циклона аэродинамическом сопротивлении.

Ниже представлены изображения расчета, выполненные в ANSYS CFX, без колец (рис. 3) и с кольцами (рис. 4).

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и на рис. 5.

Кольца имеют разную высоту. От рассекателя и до стенки золоуловителя можно отметить сначала уменьшение высоты колец, а спустя половину свободной крестовины — ее увеличение. Сделано это для того, чтобы частицы золы двигались вдоль этой изогнутой линии, часть из общей массы подсасывалась в бункер, часть увлекалась в зону пониженного давления — «уши». Из-за потери кинетической энергии в «ушах» частица за счет силы тяжести опускалась в бункер. Недостаточная высота колец может привести к тому, что частицы, проходя входной патрубок, направляются в стенку установки, и лишь часть из них будет подсасываться, как было задумано исследователями. Исходя из этого, можно сделать вывод, что наличие колец необходимо. Далее, после проведения ряда численных эксперимен-

тов [5–7], желательно проведение натурального эксперимента, чтобы подтвердить или опровергнуть ряд закономерностей, выявленных путем компьютерного моделирования.

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что наличие колец улучшает качество улавливания золы.

#### Библиографический список

1. Пат. 93298 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 01 D 45/06. Инерционно-вакуумный пылеуловитель / Белоглазов В. П.; заявитель и патентообладатель ООО «Вихрь». — № 2009144229/22; заявл. 30.11.09; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12. — 6 с.
2. Влияние скорости дисперсного потока в конфузурном сечении инерционно-вакуумного пылеуловителя на степень улавливания частиц / В. П. Белоглазов, М. В. Комаров, А. С. Мозжегоров, А. А. Петрищев, И. В. Рафальский; под ред.: В. В. Шалай, А. С. Ненишева, А. Г. Михайлова, Т. В. Новиковой // Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10 июня. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. — С. 92–95.
3. 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.
4. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль; пер. с нем. Г. А. Вольберта. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. — 576 с.
5. Белоглазов, В. П. Геометрические вариации реальной ИВЗУ / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 1 (137). — С. 128–131.
6. Белоглазов, В. П. Влияние осесимметричности «сомбре-ро» на степень эффективности улавливания инерционно-вакуумного золоуловителя / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова, И. Е. Чавриков, Н. Н. Роцин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 230–232.
7. Белоглазов, В. П. Влияние элементов геометрии ИВЗ на эффективность улавливания золы / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Вестник науки и образования. — 2015. — № 7 (9). — С. 5–9.

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

Адрес для переписки: [vpbn@mail.ru](mailto:vpbn@mail.ru)

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

Адрес для переписки: [teploblv@mail.ru](mailto:teploblv@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 11.01.2016 г.

© В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова

## О ВЫБОРЕ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОТЛОАГРЕГАТОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ И ДРУГИХ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК

**В статье проанализированы основные источники загрязнения окружающей среды в энергетике. Выявлено, что типы и марки газогорелочных устройств как для котельных установок, так и для разного рода печей существенно влияют на уровень выбросов вредных веществ, а также на полноту сгорания топлива. На основе анализа причинно-следственных связей при функционировании топливосжигающих устройств предложены методика и алгоритм выбора типа газовых горелок для конкретного агрегата в зависимости от его назначения и конструкции в условиях ремонта и реконструкции котельной установки.**

**Ключевые слова:** экологическая проблема, газовое топливо, газовая горелка, топка котла, теплопроизводительность, полнота сгорания газового топлива.

Экологическая проблема сегодня требует незамедлительных и действенных решений. Ежегодно все более частыми явлениями становятся экологические бедствия, начиная от локального до глобального уровня влияния. В результате это ведет к значительному загрязнению атмосферы, вызывая парниковый эффект, озоновые дыры, кислотные дожди и смоги [1–3]. Топливо-энергетический комплекс и транспорт относятся к наиболее распространенным источникам загрязнения окружающей среды (рис. 1).

Основной объем вредных выбросов, например, таких, как оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды, возникает в результате сжигания топлива в парогенераторах и двигателях внутреннего сгорания [3]. Для обеспечения минимизации выбросов необходимо усовершенствовать процессы горения и повышать производительность теплоиспользующих установок.

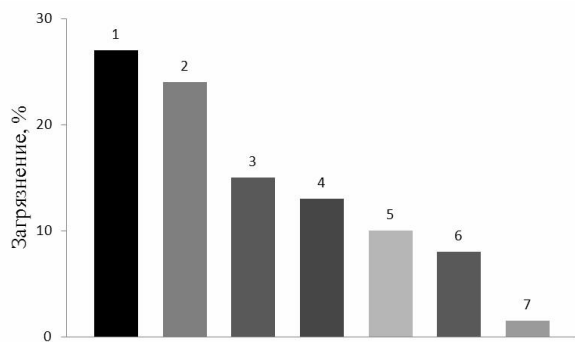
Все типы различных котельных агрегатов, технологических печей, горелочных устройств и прочего оборудования имеют свои специфические конструктивные и технологические особенности. Рациональный выбор типа и способа регулирования их работы во многом определяет состав и количество вредных выбросов [2–8].

Для достижения наиболее благоприятных условий горения, при которых потери тепла от химической неполноты сгорания газа стремятся к нулю, необходимы следующие условия: квалифицированная эксплуатация оборудования, рациональный и обоснованный выбор типа и размещения горелок, оборудование топки, хорошая организация смешения газа и воздуха и другие. Все оборудование котельной установки должно быть сертифицировано, отвечать общепринятым стандартам и техническим требованиям [1, 7].

При выборе газогорелочных устройств необходимо обратить внимание на тип и технические характеристики модели котлоагрегата (типоразмер, КПД, полезная теплотворная мощность, аэродинамическое сопротивление топки). Далее необходимо определить, какие требования предъявляют к организации сжигания топлива, определить расход газа на одну горелку, строение границы факела и характер теплообмена в топке. К основным характеристикам конструкции горелки относятся: данные о габаритах горелки, значения давлений воздуха и газа при заданных расходах, а также данные о строении образующегося факела [2, 6, 7].

При выборе типа газогорелочных устройств и их местонахождения в топке следует уделить внимание показателями, таким как длина факела и его тепловая и аэродинамическая дальность. Согласно исследованиям, данные показатели в значительной мере влияют на эффективное и безопасное использование топлива. Существующего теоретического и практического материала недостаточно для наиболее точных инженерных расчетов процесса смешения в газовых горелках, расчета хода выгорания горючих по длине факела для горелок со струйной выдачей газа в сносящий прямоточный или закрученный поток воздуха. Однако имеющихся данных достаточно, чтобы определить направление предстоящих исследований и дать предварительные рекомендации по проектированию газовых горелок для котельных установок, работающих при умеренных тепловых нагрузках топочного объема, то есть  $Q/V \leq 500 \cdot 10^3$  ккал/(м<sup>3</sup>·ч) [1–2, 6–8].

В настоящее время при огромном разнообразии типов и конструкций газогорелочных устройств существует тенденция, при которой большинство организаций, занимающихся их проектированием и разработкой, стремится к созданию универсальной



**Рис. 1. Доли загрязнений атмосферы различными отраслями техники в России:**  
 1 — теплоэнергетика, 2 — черная металлургия,  
 3 — нефтедобыча, 4 — автотранспорт,  
 5 — цветная металлургия,  
 6 — промышленность стройматериалов,  
 7 — химическая промышленность

конструкции горелки, подходящей для любых типов котельных установок. К особенностям такой универсальной горелки можно отнести более низкую цену, повсеместное применение, приоритет к достижению наиболее полного перемешивания газа с воздухом. Но если для высокофорсированных камер сгорания, работающих с тепловыми нагрузками топочного объема выше  $(1,5-2,0) \cdot 10^6$  ккал/(м<sup>3</sup>·ч), применение таких горелок может быть эффективно, то для топков котлов, в которых тепловые нагрузки не превышают  $(0,5-0,6) \cdot 10^6$  ккал/(м<sup>3</sup>·ч), оно не оправдывается [2, 5]. Поэтому выбор горелок требует индивидуального подхода к каждому газосжигающему агрегату для данных конкретных условий с учетом получения наиболее эффективных результатов. Положительными характеристиками конструкций горелочных устройств являются: простота (отсутствие подвижных частей, деталей сложных форм), минимизация сопротивления при движении воздуха и газового топлива, а также их регулируемая подача. В отдельных случаях целесообразно применять горелки сложных конструкций, например, при установке одной газовой горелки на котельном агрегате, тепловой режим работы которого характеризуется изменчивостью во времени.

Также при рассмотрении различных типов газогорелочных устройств не стоит отдавать предпочтение какому-либо одному способу сжигания газа, например кинетическому или диффузионному. Практика показывает, что для котельных агрегатов могут применяться любые виды горения, если они выбраны с учетом всех необходимых требований: производительности агрегата и его конструктивных особенностей, конфигурации и геометрических размеров топочной камеры, степени ее экранирования и т.д.

Для котельных агрегатов промышленного назначения наиболее часто применяются горелки, основанные на многоструйном распределении газа в поперечном воздушном потоке. Для разделения топливного потока на несколько струй в основном используют специальную насадку с нужным количеством отверстий. Подача струй газа в поток воздуха, который может быть прямоточным или иметь предварительную закрутку, производится с центра или с периферии. Развитие и перемешивание струй в поперечном потоке воздуха является достаточно сложным и малоизученным процессом [6, 7].

Различные типы инжекционных и короткофакельных двухпроводных горелок нашли широкое применение для кузнечных печей. Для крупных технологических печей предпочтительнее выбирать горелочные устройства с многословными смесителями.

Камеры секционных печей малого объема, предназначенные для скоростного нагрева металла под прокатку, а также термической обработки, работают с высокими тепловыми напряжениями (около  $10^6$  ккал/(м<sup>3</sup>·ч)). Для организации наиболее полного и эффективного сгорания топлива при таких условиях рационально применять короткопламенные, а также инжекционные горелочные устройства с предварительным перемешиванием. При работе на подогретом воздухе рационально применить горелки двухпроводные короткофакельные или с частичным предварительным смешением, что обеспечивает уменьшение вероятности проскока пламени [6, 7].

В промышленности и в коммунальном хозяйстве широкое применение нашли вертикально и горизонтально водотрубные котлы малой мощности. Газогорелочные устройства для таких котельных агрегатов подразделяются на несколько основных типов: подовые, с принудительной подачей воздуха, комбинированные или инжекционные среднего давления [1, 2, 4].

При установке в котлах, печах и аппаратах инжекционных горелок среднего давления газа, обычно выбирают горелки с пластинчатым стабилизатором горения. Благодаря насадке со стабилизатором обеспечивается устойчивый режим работы горелок без отрыва факела от горелки.

При переводе жаротрубных котлов на газовое топливо могут быть использованы газовые горелки низкого давления с принудительной подачей воздуха или инжекционные горелки среднего давления с пластинчатыми стабилизаторами горения или огнеупорными туннелями.

Для некоторых котлов большой мощности необходимо предусмотреть возможность сжигания нескольких видов топлива. В таком случае следует применить газогорелочное устройство комбинированного типа. В отличие от отдельных горелок, комбинированные могут работать на двух или трех видах топлива, иногда и более (газомазутные, газодизельные, пылегазовые). Существенным преимуществом является быстрый переход с одного вида топлива на другой либо их одновременное использование.

Газовые горелки с принудительной подачей воздуха целесообразней устанавливать в котельных агрегатах с противодавлением в топочной камере, так как они, в отличие от инжекционных, менее чувствительны к нему.

Согласно теоретическим и опытным данным, эффективным является комплексное рассмотрение работы горелочных устройств и топочной камеры. Неэффективная работа горелок в ряде случаев может быть значительно улучшена путем рационального и обоснованного их размещения на котлоагрегате. Первые рекомендации по выбору различных компоновок горелок в основном основываются на данных наладочных испытаний и опыте эксплуатации и поэтому не могут быть признаны достаточными [2].

Таким образом, выбор компоновки и количества горелок зависит от конкретных условий: производительности агрегата и диапазона его регулирования,

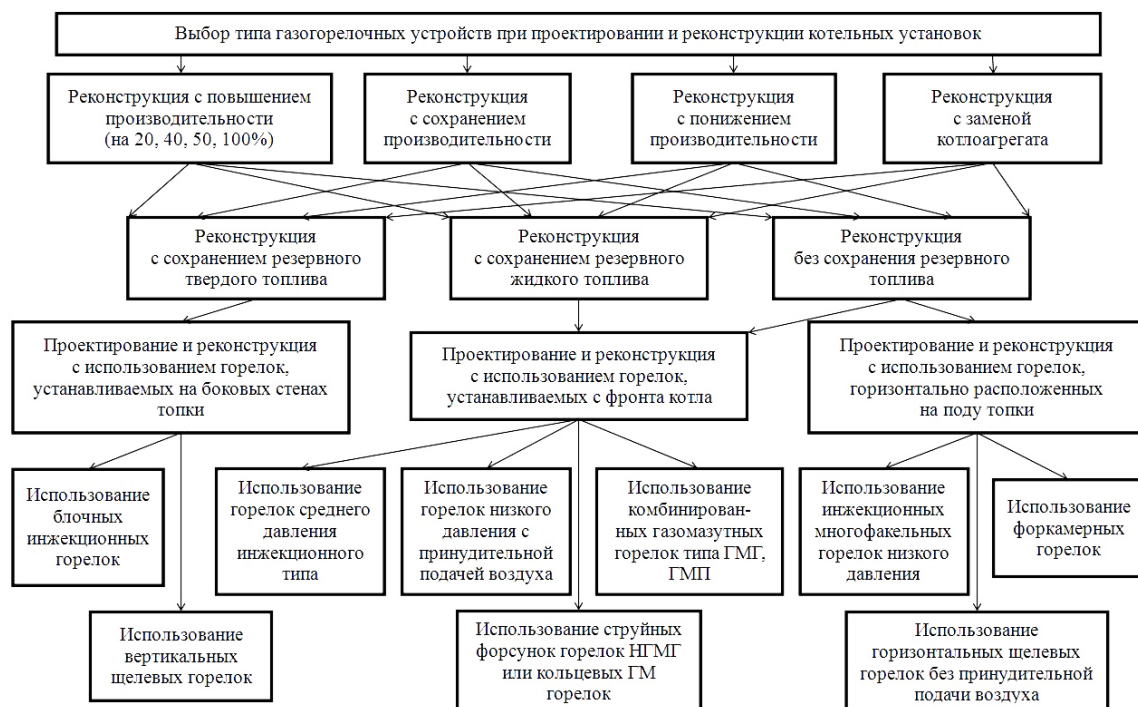


Рис. 2. Алгоритм выбора газовых горелок для котлоагрегатов

конструкции топочной камеры, степени экранирования, вида резервного топлива и способа его сжигания (слоевой или камерный), степени автоматизации процесса горения, а также характеристик работы горелки (длина факела и его дальность). Так, например, при встречном и шахматном расположении газогорелочных устройств существуют свои нюансы. При встречном важно, чтобы длина факела не перекрывала более половины пространства топки. При шахматном расположении горелок на боковых поверхностях печи необходимо, чтобы длина факела находилась в пределах 0,8–0,9 поперечного размера топочной камеры [2, 4, 5].

Используя метод причинно-следственных связей, на основе анализа литературных источников [1–8] разработан алгоритм выбора газогорелочных устройств при проектировании и реконструкции котельных установок (рис. 2).

В дальнейшем предполагается провести варианты проверочные расчеты выбранных горелок как по экологическим критериям, так и по технико-экономическим с использованием апробированных методик [1, 2, 5–8].

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

1. При выборе газовой горелки необходимо предусмотреть наиболее эффективную величину химического недожога по длине факела при минимальном химическом недожоге.
2. Обеспечить наиболее благоприятную интенсивность химического недожога по длине факела.
3. Предложенная уточненная методика (алгоритм) выбора типоразмера горелки является универсальной и пригодна для подбора и расчета горелок для различных котлов, работающих на разных видах газового топлива.

лок для различных котлов, работающих на разных видах газового топлива.

#### Библиографический список

1. Воликов, А. Н. Сжигание газового и жидкого топлива в котлах малой мощности / А. Н. Воликов. — Л.: Недра, 1989. — 160 с.
2. Эстеркин, Р. И. Перевод промышленных котлов на газообразное топливо / Р. И. Эстеркин. — Л.: Энергия, 1967. — 207 с.
3. Пугач, Л. И. Энергетика и экология / Л. И. Пугач. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 504 с.
4. Шур, И. А. Перевод отопительных котлов на газообразное топливо / И. А. Шур. — Л.: Недра, 1973. — 264 с.
5. Ведрученко, В. Р. Энергоэкологическая эффективность организационных и технических мероприятий при эксплуатации котельных / В. Р. Ведрученко, Н. В. Жданов // Промышленная энергетика. — 2008. — № 11. — С. 25–30.
6. Иванов, Ю. В. Основы расчета и проектирования газовых горелок / Ю. В. Иванов. — М.: Гостоптехиздат, 1963. — 359 с.
7. Иванов, Ю. В. Газогорелочные устройства / Ю. В. Иванов. — М.: Недра, 1972. — 276 с.
8. Равич, М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов / М. Б. Равич. — М.: АН СССР, 1961. — 90 с.

**БЕЛЬСКАЯ Татьяна Игоревна**, аспирантка кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: belskayati@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23.12.2015 г.

© Т. И. Бельская



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ ЕСТЕСТВЕННОЙ НЕСИММЕТРИИ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Статья посвящена оценке влияния естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи на величину напряжения нулевой последовательности в сетях с компенсированной нейтралью. В статье приводится расчет параметров воздушной линии напряжением 35 кВ, а также зависимость напряжения нулевой последовательности от сопротивления дугогасящего реактора.

**Ключевые слова:** емкость воздушной линии, напряжение нулевой последовательности, дугогасящий реактор, резонанс.

Доля работающих в России автоматических регуляторов настройки компенсации емкостного тока, использующих искусственное смещение нейтрали [1]. Создание искусственной несимметрии реализуется несколькими способами, одним из которых является подключение дополнительного конденсатора к фазе сети.

К недостаткам этого способа можно отнести необходимость использования дополнительной коммутационной аппаратуры, что увеличивает стоимость электрической сети.

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) обладают естественной несимметрией, что может быть использовано для настройки дугогасящего реактора.

## 1. Расчет параметров воздушной линии 35 кВ.

Емкости ВЛ определяются методом зеркальных изображений на основе обращения матрицы потенциальных коэффициентов, которая имеет вид [2, 3]

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_a & \alpha_{ab} & \alpha_{ac} \\ \alpha_{ba} & \alpha_b & \alpha_{bc} \\ \alpha_{ca} & \alpha_{cb} & \alpha_c \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Собственные потенциальные коэффициенты неизолированных ВЛ (диагональные элементы) на единицу длины определяются по формуле:

$$\alpha_{i,i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{np}}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $h_i$  — высота расположения провода данной фазы над поверхностью земли;  $r_{np}$  — радиус провода.

Взаимные потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{i,j} = \alpha_{j,i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'_{i,j}}{r_{i,j}}, \quad (3)$$

где  $r_{i,j}$  — расстояние между проводами фаз  $i$  и  $j$ ;  $r'_{i,j}$  — расстояние от провода  $i$  до зеркального отражения провода  $j$  относительно поверхности земли.

Значение  $r'_{i,j}$  определяется из геометрических соотношений, с учетом применения теоремы косинусов по выражению:

$$r'_{i,j} = \sqrt{r_{i,j}^2 + 4h_{\max}h_{\min}}, \quad (4)$$

где  $h_{\max}$  — наибольшая высота расположения провода фазы над поверхностью земли;  $h_{\min}$  — наименьшая высота расположения провода фазы над поверхностью земли.

Обращенная матрица потенциальных коэффициентов представляет собой матрицу коэффициентов электростатической индукции:

$$\beta = \alpha^{-1} = \begin{pmatrix} \beta_a & \beta_{ab} & \beta_{ac} \\ \beta_{ba} & \beta_b & \beta_{bc} \\ \beta_{ca} & \beta_{cb} & \beta_c \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Погонные фазные ( $C_{0,a}$ ,  $C_{0,b}$ ,  $C_{0,c}$ ) и междуфазные ( $C_{0,ab}$ ,  $C_{0,bc}$ ,  $C_{0,ac}$ ) емкости ВЛ определяются с учетом полученных в (5) коэффициентов по формулам (6) и (7) соответственно:

$$\begin{aligned} C_{0,a} &= \beta_a + \beta_{ab} + \beta_{ac}, \\ C_{0,b} &= \beta_b + \beta_{ab} + \beta_{bc}, \\ C_{0,c} &= \beta_c + \beta_{ac} + \beta_{bc}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C_{0,ab} &= -\beta_{ab}, \\ C_{0,bc} &= -\beta_{bc}, \\ C_{0,ac} &= -\beta_{ac}. \end{aligned} \quad (7)$$

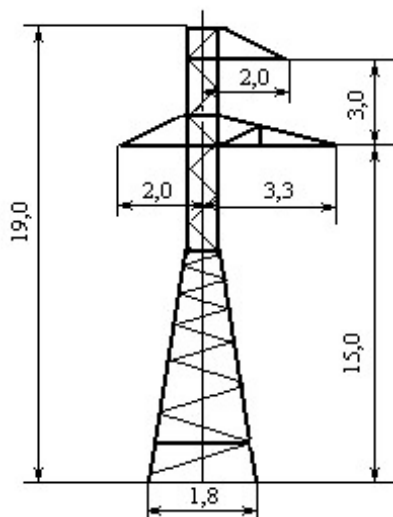


Рис. 1. Стальная промежуточная одноцепная опора ВЛ-35 кВ

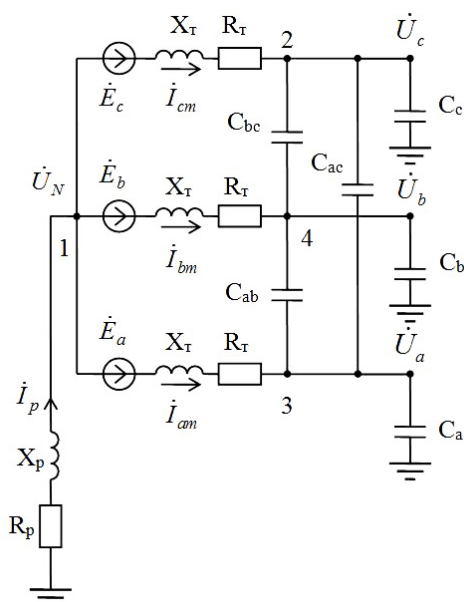


Рис. 2. Схема замещения электрической сети 35 кВ с компенсированной нейтралью

Представим результаты расчета емкостей ВЛ напряжением 35 кВ, выполненной на стальных опорах (рис. 1) [4], по выражениям (6, 7):

$$\begin{aligned} C_{0,a} &= 4,784 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км,} \\ C_{0,b} &= 4,270 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км,} \\ C_{0,c} &= 4,517 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км,} \\ C_{0,ab} &= 1,307 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км,} \\ C_{0,bc} &= 1,767 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км,} \\ C_{0,ac} &= 1,170 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км.} \end{aligned}$$

Анализ результатов расчета емкостей ВЛ показывает:

- различие фазных емкостей составляет до 5,7 % относительно среднего значения по фазам;
- различие междуфазных емкостей составляет до 25 % относительно их среднего значения.

**2. Определение параметров схемы замещения электрической сети.** Для определения напряжения нулевой последовательности составим схему замещения электрической сети 35 кВ с компенсирован-

ной нейтралью, содержащей ВЛ на холостом ходу, без учета активных и индуктивных сопротивлений (рис. 2).

Параметры силового трансформатора (ТДН-25000/110) приводятся к низшему напряжению и определяются с учетом равных мощностей обмоток высшего и низшего напряжений по выражениям [5]:

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_{nn}^2}{2S_n^2}, \quad (8)$$

$$X_T = \frac{U_{к\%} U_{nn}^2}{2S_n \cdot 100}, \quad (9)$$

где  $\Delta P_k$  — потери короткого замыкания, МВт;  $U_{к\%}$  — напряжение короткого замыкания, %;  $U_{nn}$  — номинальное низшее напряжение, кВ;  $S_n^2$  — номинальная мощность трансформатора, МВА.

Активное сопротивление реактора можно определить через номинальные потери активной мощности  $\Delta P_p$ , номинальную мощность  $S_{ном,p}$  и номинальное напряжение  $U_{ном,p}$  реактора:

$$R_p = \Delta P_p \frac{U_{ном,p}^2}{S_{ном,p}^2}. \quad (10)$$

Индуктивное сопротивление реактора настраивается на фазную емкость и соответствует сумме емкостных сопротивлений на землю воздушной линии (при резонансе):

$$X_p = \frac{1}{\omega(C_{0,a} + C_{0,b} + C_{0,c})}, \quad (11)$$

где  $\omega$  — циклическая частота,  $c^{-1}$ .

**3. Определение напряжения нулевой последовательности.** По методу узловых потенциалов для схемы замещения (рис. 2) запишем систему уравнений для узлов 1–4 [6]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 G_{11} + \dot{\varphi}_2 G_{12} + \dot{\varphi}_3 G_{13} + \dot{\varphi}_4 G_{14} &= \dot{J}_{11}, \\ \dot{\varphi}_1 G_{21} + \dot{\varphi}_2 G_{22} + \dot{\varphi}_3 G_{23} + \dot{\varphi}_4 G_{24} &= \dot{J}_{22}, \\ \dot{\varphi}_1 G_{31} + \dot{\varphi}_2 G_{32} + \dot{\varphi}_3 G_{33} + \dot{\varphi}_4 G_{34} &= \dot{J}_{33}, \\ \dot{\varphi}_1 G_{41} + \dot{\varphi}_2 G_{42} + \dot{\varphi}_3 G_{43} + \dot{\varphi}_4 G_{44} &= \dot{J}_{44}. \end{aligned} \quad (12)$$

где  $G_{11'}$ ,  $G_{22'}$ ,  $G_{33'}$ ,  $G_{44'}$  — сумма проводимостей ветвей, сходящихся в соответствующем узле с номером в индексе;  $G_{11'}$ ,  $G_{13'}$ ,  $G_{14'}$ ,  $G_{21'}$ ,  $G_{23'}$ ,  $G_{24'}$ ,  $G_{31'}$ ,  $G_{32'}$ ,  $G_{34'}$ ,  $G_{41'}$ ,  $G_{42'}$ ,  $G_{43'}$  — сумма проводимостей ветвей, непосредственно соединяющие узлы с номерами в индексе, взятая со знаком минус.

Определим суммарные проводимости ветвей с учетом проводимостей отдельных ветвей:

$$\begin{aligned} G_{11} &= g_{10} + g_{12} + g_{13} + g_{14}, \\ G_{22} &= g_{20} + g_{22} + g_{23} + g_{24}, \\ G_{33} &= g_{30} + g_{31} + g_{32} + g_{34}, \\ G_{44} &= g_{40} + g_{41} + g_{42} + g_{43}. \end{aligned} \quad (13)$$

Определим узловые токи соответствующих узлов:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{11} &= -(\dot{E}_{12} g_{12} + \dot{E}_{13} g_{13} + \dot{E}_{14} g_{14}), \\ \dot{J}_{22} &= \dot{E}_{12} g_{12}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\dot{J}_{33} = \dot{E}_{13} g_{13},$$

$$\dot{J}_{44} = \dot{E}_{14} g_{14}.$$

ЭДС ветвей соответствуют ЭДС трехфазной системы напряжением 35 кВ, которые определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{13} &= 20207B; \\ \dot{E}_{14} &= 20207e^{-j120} B; \\ \dot{E}_{12} &= 20207e^{j120} B. \end{aligned} \quad (15)$$

Решением системы уравнений (12) является определение потенциалов узлов 1–4 схемы замещения (рис. 2), в том числе узла 1 ( $\Phi_1$ ), являющимся напряжением смещения нейтрали  $U_N$ . Согласно [7], реактор должен настраиваться на фазную емкость с рассогласованием до 0,2. Величина напряжения нулевой последовательности определяется в зависимости от изменения индуктивного сопротивления дугогасящего реактора в интервале  $(0,8-1,2) X_p$  (рис. 3).

Из графика (рис. 3) видно, что при настройке дугогасящего реактора на резонанс (максимальное значение кривой напряжения  $U_N$ ), напряжение нулевой последовательности может превышать 12 кВ.

#### Выводы.

1. Наличие естественной несимметрии воздушной линии, появляющейся ввиду различных значений фазных и междупазных емкостей, приводит к появлению напряжения нулевой последовательности.

2. Максимальное значение напряжения нулевой последовательности достигается при настройке реактора в резонанс.

3. Максимальная величина напряжения смещения нейтрали в значительной степени зависит от добротности контура нулевой последовательности. В связи с тем, что добротность контура достаточно высокая, напряжение нулевой последовательности может превышать номинальное фазное напряжение, что необходимо учитывать при использовании дугогасящих реакторов.

#### Библиографический список

1. Миронов, И. А. Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И. А. Миронов // *Новости электротехники*. — 2007. — № 5 (47). — Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/47/06.php>. (дата обращения: 21.12.2015).
2. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 3 т. Т. 3 / К. С. Демирчан [и др.]. — СПб. : Питер, 2006. — 377 с.
3. Бессолицын, А. В. Разработка методики численного расчета продольных параметров воздушной линии на основе трех-

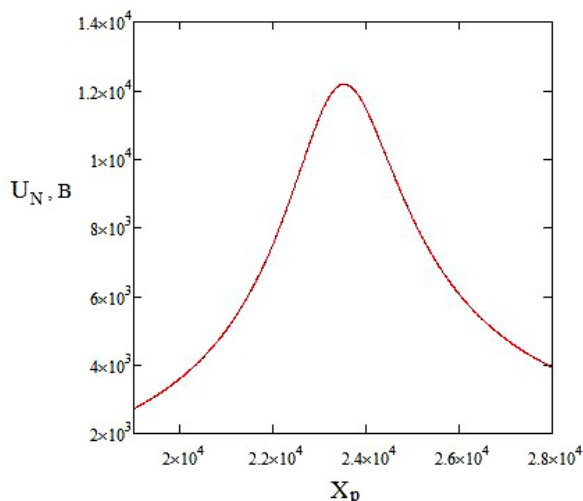


Рис. 3. Зависимость напряжения нулевой последовательности от сопротивления дугогасящего реактора

мерной краевой задачи / А. В. Бессолицын, О. А. Новоселова, М. Г. Попов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. — 2010. — № 2. — С. 50–55.

4. Герасимов, В. Г. *Электротехнический справочник*. В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]; гл. ред. А. И. Попов. — 9-е изд., стер. — М. : Изд-во МЭИ, 2004. — 964 с.

5. Идельчик, В. И. *Электрические системы и сети : учеб. для вузов* / В. И. Идельчик. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.

6. Бессонов, Л. А. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи* / Л. А. Бессонов. — М. : Высшая школа, 1996. — 580 с.

7. Сирота, И. М. *Режимы нейтрали электрических сетей* / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. — Киев : Наукова думка, 1985. — 264 с.

**САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: [SafonovDG@mail.ru](mailto:SafonovDG@mail.ru)

**ОЩЕПКОВ Владимир Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: [energoowa@mail.ru](mailto:energoowa@mail.ru)

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: [stansg@mail.ru](mailto:stansg@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 30.12.2015 г.

© Д. Г. Сафонов, В. А. Ощепков, С. С. Гиршин

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ В РАЗРЯЖЕННОЙ СРЕДЕ

В статье рассмотрены особенности теплообмена при кипении жидкости в разряженной среде, влияющие на эффективность работы теплообменного оборудования. Предложен метод интенсификации процесса теплообмена при давлениях ниже атмосферного.

**Ключевые слова:** вакуумный котел, кипение, теплоотдача, давление, обребрение, капиллярная постоянная.

В настоящее время широкое распространение получили теплообменные аппараты, в которых происходит кипение теплоносителя. Подобные теплообменники используются в самых разнообразных теплотехнологических установках в различных отраслях промышленности: микробиологической, химической, пищевой, металлургической, а также в теплоэнергетике.

Эффективность функционирования подобных устройств зависит от интенсивности теплоотдачи в зоне кипения, в том числе и при давлениях ниже атмосферного.

Примером теплоэнергетического оборудования является вакуумный котел.

Давление ниже атмосферного влияет на интенсивность теплообмена со стенкой. Переход к процессу кипения в областях с пониженным давлением связан с ухудшением теплообмена вследствие уменьшения числа соударений молекул с поверхностью и между собой. При разряжении создаются значительные трудности в образовании паровой фазы на поверхности нагрева, уменьшается число активных центров парообразования, увеличивается критический радиус парового пузырька, изменяются характеристики процесса кипения (скорость роста, отрывной диаметр, частота отрыва паровых пузырьков) [1].

В дальнейшем будет рассмотрен процесс кипения при естественной конвекции в замкнутом объеме при различных давлениях насыщенных паров. Переход к конвективным явлениям в областях с пониженным давлением связан с дальнейшим ухудшением теплообмена.

Температура насыщения определена с использованием модификации уравнения Клапейрона предложенной Антуана для диапазона давлений от 1 до 200 кПа:

$$\ln p_v = A - \frac{B}{T + C},$$

где  $T$  — температура насыщения, константы  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Значения констант определены методом регрессии экспериментальных данных.

При давлениях свыше 200 кПа температуры насыщения определяется по расширенной формуле:

$$P = \exp\left(A + \frac{B}{C+T} + D \cdot T + E \cdot T^2 + F \cdot \ln(T)\right),$$

где константы  $D$ ,  $E$  и  $F$  — справочные величины [2].

Уравнение Антуана демонстрирует неразрывную взаимосвязь между такими параметрами, как давление и температура.

Существуют различные методики для расчета коэффициентов теплоотдачи ( $\alpha$ ) при кипении жидкости. Так как коэффициент теплоотдачи жидкости зависит только от режимных параметров ( $q$ ,  $p$ ), то для практических расчетов применяются эмпирические зависимости.

При расчете процесса кипения в большом объеме в диапазоне давлений от 1 до 200 бар возможно применение соотношения М. А. Михеева и И. М. Михеевой:

$$\alpha = \frac{3,4p^{0,18}}{1 - 0,0045p} q^{2/3},$$

или, согласно авторам В. П. Исаченко, В. А. Осипову, А. С. Сукомелу:

$$\alpha = 3,0q^{0,7}p^{0,15}.$$

При расчете теплоотдачи в зоне развитого кипения и при более высоких тепловых потоках и давлении целесообразно применять расчетную зависимость Ю. М. Липова и Ю. М. Третьякова:

$$\alpha = 0,9 \cdot 4,34 \cdot q^{0,7} (p^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot p^2),$$

где  $p$  — давление насыщенных паров,  $q$  — плотность теплового потока [3].

Вопросы расчета коэффициентов теплоотдачи также рассмотрены в трудах других авторов [4].

Изменения механизма и интенсивности теплообмена приводят к возникновению кризисов кипения, наличие которых отрицательно сказывается на общей эффективности вакуумного котла. Одним из определяющих факторов возникновения кризисов кипения и параметров, свидетельствующих о интенсивности процесса теплообмена, является коэффициент теплоотдачи, который уменьшается с понижением давления. Возникает необходимость



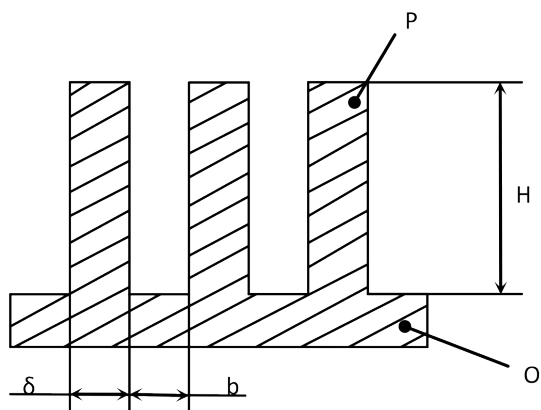


Рис. 1. Расчетная схема оребренной поверхности

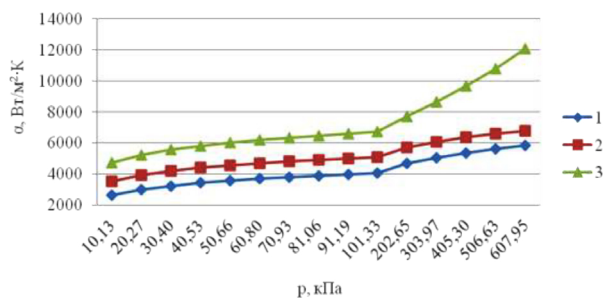


Рис. 2. Зависимости коэффициентов теплоотдачи при кипении жидкости от давления насыщенных паров:  
 1 — М. А. Михеев, И. М. Михеева;  
 2 — В. П. Исаченко, В. А. Осипов, А. С. Сукомел;  
 3 — Ю. М. Липов, Ю. М. Трегьяков

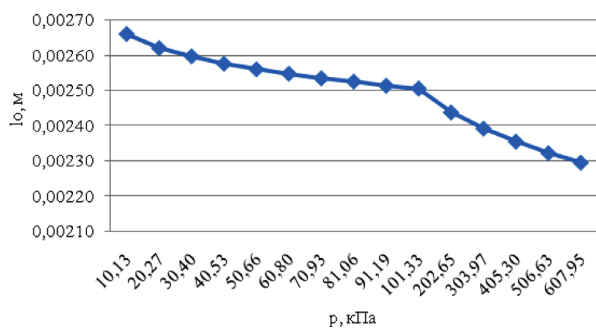


Рис. 3. Влияние давления на величину капиллярной постоянной кипящей жидкости

применения интенсификаторов. Наиболее эффективный метод интенсификации — это организация процесса кипения в системе капиллярных щелевых каналов. Данные каналы могут быть образованы путем формирования поверхности теплообмена системой ребер, размещаемых со стороны кипящего теплоносителя [5, 6].

Организация процесса кипения в системе капиллярных щелевых каналов требует соблюдения условия, при котором величина щелевого зазора между соседними ребрами не превышает величины капиллярной постоянной кипящей жидкости. Капиллярная постоянная кипящей жидкости рассчитывается по формуле:

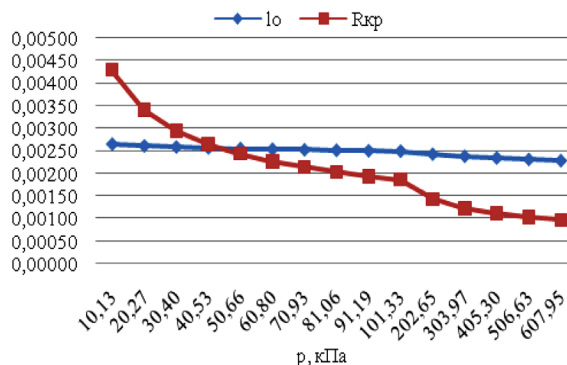


Рис. 4. Расчетные зависимости для пузырькового кипения жидкости

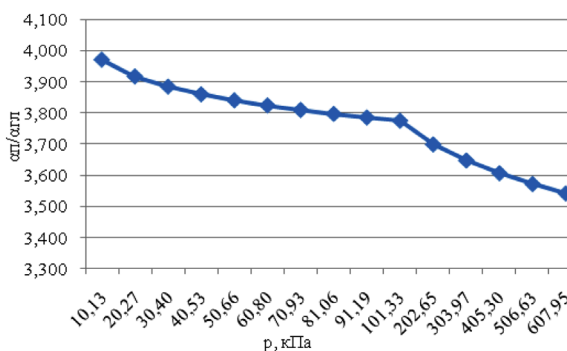


Рис. 5. Влияние давления на относительную эффективность оребрения

$$l_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(p_{жс} - p_n)}}$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения кипящей жидкости;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $p_{жс}$ ,  $p_n$  — плотность жидкости и пара.

Величина щелевого зазора должна подбираться с учетом критического радиуса парового пузырька, которые меняются с понижением давления. Формула для расчета критического радиуса парового пузырька:

$$R_{кр} = \frac{2\sigma T_n}{r p_n (T_c - T_n)}$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения кипящей жидкости;  $p_n$  — плотность пара;  $r$  — теплота парообразования;  $T_c$  — температура стенки;  $T_n$  — температура насыщения [1].

Моделирование процесса кипения в разреженном объеме происходит в системе капиллярных щелевых каналов (рис. 1). Щелевые каналы образуются путем снабжения гладкой поверхности (O) системой ребер (P). Главная задача обеспечить оптимальные геометрические параметры поверхности ребер. К ним относятся: высота ребра (H), толщина ребра ( $\delta$ ), щелевой зазор между ребрами (b).

Исследуемый диапазон давлений 10–608 кПа. Расчеты производились при постоянной высоте и толщине ребра. Щелевой зазор между ребрами подбирался индивидуально для каждого давления.

Расчет коэффициента теплоотдачи по трем разным методикам подтвердил влияние давления

ниже атмосферного на интенсивность теплообмена в разряженной полости, с понижением давления происходит снижение коэффициента теплоотдачи (рис. 2). Снижение интенсивности процесса кипения в разряженной полости приводит к снижению КПД теплообменного аппарата в пределах 5 % [3].

Важной задачей является подбор геометрических характеристик оребрения таким образом, чтобы обеспечивался максимальный эффект. Необходимо учитывать динамику изменения величины капиллярной постоянной кипящей жидкости и критического радиуса парового пузырька в различном диапазоне давлений (рис. 3–4). С понижением давления капиллярная постоянная и критический радиус парового пузырька увеличивается вследствие уменьшения плотностей жидкости и пара.

Анализ полученных расчетных данных двух параметров, капиллярной постоянной кипящей жидкости и критического радиуса парового пузырька (рис. 4), позволил выделить диапазон давлений, где данный метод интенсификации эффективен. Рабочий диапазон давлений ограничен давлением 60 кПа. При дальнейшем понижении давлений критический радиус парового пузырька начинает превышать величину капиллярной постоянной кипящей жидкости, требуется более тщательный подбор метода интенсификации в диапазоне от 10 до 60 кПа, так как существует возможность попадания в режим неустойчивого кипения.

Применение оребрения со стороны кипящего теплоносителя увеличивает коэффициент теплоотдачи (рис. 5) и эффективность теплообмена в целом.

Данный метод эффективен для интенсификации процесса кипения в интервале давлений от 60 до 608 кПа.

#### Библиографический список

1. Исаченко, В. П. Теплопередача : учеб. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоиздат, 1981. — 416 с.
2. Reid, R. C. The Properties of Gases and Liquids / R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Polling. — 4th edition, McGraw-Hill, New York, 1988. — 803 p.
3. Слободина, Е. Н. Влияние процесса кипения в разряженной полости на эффективность работы вакуумного котла / Е. Н. Слободина // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 185–187.
4. H. Feldmann, A. Luke, Nucleate boiling in water for different pressures // International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 14–17, 2008. — P. 1–8.
5. Влияние теплофизических свойств материала оребренной поверхности на выбор ее оптимальных геометрических характеристик / С. Д. Корнеев [и др.] // Известия МГИУ. — 2006. — № 1 (2). — С. 56–61.
6. Справочник по теплообменникам. В 2 т. Т. 1 / Под ред. О. Г. Мартыненко ; пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 560 с.

**СЛОБОДИНА Екатерина Николаевна**, ассистент кафедры теплоэнергетики.

**МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой теплоэнергетики.

Адрес для переписки: slobodina\_e@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13. 01. 2016 г.

© Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов

## Книжная полка

621.311/Г90

**Грунин, В. К. Основы электроснабжения объектов. Расчет электрических нагрузок : [Электронный ресурс] / В. К. Грунин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

Рассмотрены характеристика и структура систем электроснабжения, классификация и характеристика как приемников, так и потребителей электрической энергии. Представлены графики электрических нагрузок и коэффициенты, характеризующие графики. Приведены методы расчета нагрузок на различных уровнях СЭС и даны рекомендации по их выбору.

Предназначен для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

**Суворин, А. Современный справочник электрика / А. Суворин ; под ред. Д. Волковой. — Ростов н/Д. : Феникс, 2016. — 517 с. — ISBN 978-5-222-26212-2.**

В справочнике в доступной форме кратко изложены основные общетехнические положения, необходимые электротехнику. В книгу включены сведения по теоретической электротехнике, электротехническим материалам, электроснабжению потребителей, дано краткое описание силового и осветительного оборудования, технические характеристики и справочные данные, рассмотрены однофазные и трехфазные трансформаторы, асинхронные и синхронные машины, машины постоянного тока. Даны сведения по качеству электроэнергии, электронным приборам и их практическому применению. Кроме того, в справочнике представлены схемы различных полезных устройств для самостоятельного изготовления понравившейся конструкции.

Справочник предназначен для инженеров и техников по специальности электроснабжение по отраслям (городов, промышленных предприятий и сельского хозяйства), а также для электриков и электромонтеров, занимающихся монтажом, эксплуатацией и ремонтом электрооборудования и различных электрических сетей. Кроме того, он будет полезен и широкому кругу домашних мастеров.