

УДК 697.244

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-33-42

Разработка и создание отечественного высокоэффективного энергетического оборудования малой мощности

П.В. Росляков, Б.Г. Гриша, И.Л. Ионкин, М.Н. Зайченко

Один из путей повышения эффективности и экологически чистого использования топлив — создание высокоэффективного малоэмиссионного отечественного энергетического оборудования, в частности, малогабаритных водогрейных котлов в системах автономного теплоснабжения.

Повышение коэффициента полезного действия (КПД) котла требует снижения температуры уходящих дымовых газов, что, в свою очередь, можно обеспечить за счет установки дополнительных поверхностей нагрева. Надежность и экологическая безопасность работы котлов во многом определяются горелочными устройствами.

Цель настоящей работы — определение принципиальных конструктивных решений для водогрейного котла повышенной эффективности мощностью 3 МВт, сжигающего сырую нефть, и разработка для него современного малоэмиссионного горелочного устройства. Обеспечение высокого КПД котла реализуется благодаря предвключенному выносному экономайзеру, что позволяет уменьшить габариты котла, облегчить компоновку оборудования в ограниченных размерах блочно-модульной котельной и практически исключить низкотемпературную коррозию поверхностей теплообмена.

По результатам проведенных исследований разработаны конструкции выносного экономайзера с расположением над котлом в блочно-модульной котельной и нового комбинированного малоэмиссионного горелочного устройства, имеющие ряд преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами. Они успешно прошли заводские испытания.

Ключевые слова: жаротрубный котел, выносной экономайзер, малоэмиссионное горелочное устройство, блочно-модульная котельная, оксиды азота, энергоэффективность.

Для цитирования: Росляков П.В., Гриша Б.Г., Ионкин И.Л., Зайченко М.Н. Разработка и создание отечественного высокоэффективного энергетического оборудования малой мощности // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 33—42. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-33-42.

Development and Construction of Domestic High-Efficient Small-Capacity Power Equipment

P.V. Roslyakov, B.G. Grisha, I.L. Ionkin, M.N. Zaichenko

One possible way of achieving more efficient and environmentally friendly use of fuels is to develop domestic high-efficient low-emission power equipment, in particular, compact hot-water boilers in self-contained heat supply systems.

Increasing the boiler efficiency entails the need to decrease the flue gas temperature, which, in turn, can be achieved by installing additional heating surfaces. The reliability and environmental safety of boiler operation depends in many respects on burner devices.

The aim of this work is to determine the basic design solutions for a 3 MW high-efficient hot water boiler firing crude oil and to develop a modern low-emission burner for it. High-efficient performance of the boiler is achieved by using an external topping economizer, a solution that makes it possible to reduce the boiler sizes, to facilitate the equipment layout within the limited space of a modular boiler house, and almost completely eliminate low-temperature corrosion of the heat transfer surfaces.

The study results were used as a basis for designing the structural components of an external economizer arranged above the boiler in a modular boiler house, and for designing a new combined low-emission burner. Both the newly designed economizer and burner have a number of advantages over their foreign analogs and have successfully passed factory tests.

Key words: fire-tube boiler, external economizer, low-emission burner, modular boiler house, nitrogen oxides, energy efficiency.

For citation: Roslyakov P.V., Grisha B.G., Ionkin I.L., Zaichenko M.N. Development and Construction of Domestic High-Efficient Small-Capacity Power Equipment. MPEI Vestnik. 2018;6:33—42. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-33-42.

В настоящее время в соответствии с планом долгосрочной энергетической политики Российской Федерации, Федеральным законом № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» большое внимание уделяется повышению эффективности и экологической безопасности использования топлива. Одним из основных путей решения поставленной задачи является разработка и создание высокоэффектив-

ного отечественного энергетического оборудования с пониженной эмиссией вредных выбросов в атмосферу. В частности, в энергетической стратегии России на период до 2030 г. предусмотрены создание и организация серийного производства установок малой энергетики в связи с резко возросшим в последние годы интересом к малогабаритным водогрейным котлам в системах автономного теплоснабжения [1].

Представленные на рынке водогрейные котлы небольшой мощности (0,1...4 МВт) обладают коэффици-

ентом полезного действия (КПД) на уровне 90...92% при сжигании природного газа и дизельного топлива и, как правило, не предназначены для сжигания серосодержащих топлив (мазута, сырой нефти). Котлы, работающие на мазуте, имеют КПД 87...90%, что объясняется необходимостью поддержания высокой температуры уходящих газов до 250 °С для снижения интенсивности низкотемпературной сернистой коррозии хвостовых поверхностей нагрева.

Большинство из предлагаемых на рынке жаротрубных котлов оснащены зарубежными дутьевыми горелками. В соответствии с принятым Правительством РФ направлением на импортозамещение и создание отечественного эффективного оборудования разработка современного малоэмиссионного горелочного устройства для отечественных жаротрубных котлов малой мощности становится весьма актуальной задачей и обусловлена необходимостью повышения надежности работы и снижения эмиссии оксидов азота по сравнению с зарубежными аналогами.

Цель настоящей работы — разработка жаротрубного водогрейного котла повышенной эффективности мощностью 3 МВт, использующего в качестве основного топлива сырую нефть (табл. 1) и создание современного малоэмиссионного горелочного устройства, обеспечивающего эффективное и экологически чистое сжигание топлива. Подобные котлы, устанавливаемые в блочно-модульных котельных (БМК), эксплуатируются на подведомственных объектах ПАО «АК «Транснефть» и должны соответствовать техническим характеристикам, представленным в табл. 2.

Особое требование предъявляется к повышению эффективности использования топлива, исходя из чего КПД разрабатываемого котла должен быть не ниже 94%. Очевидно, что обеспечение подобного КПД само по себе не является технической проблемой. Однако в данном случае задача решается в условиях двух серьезных ограничений. Первое из них — габариты

Таблица 1

Состав и характеристики сырой нефти

Характеристика	Значение
Рабочая масса топлива, %:	
W^p	3,00
A^p	0,10
S^p	2,90
C^p	81,8
H^p	11,8
N^p	0,00
O^p	0,40
Теплота сгорания Q_n^p , МДж/кг	39,77
Теоретический объем, м ³ /м ³ :	
воздуха V_o^h	10,48
трехатомных газов $V_{R_2O}^h$	1,55
азота $V_{o.N_2}^h$	8,28
водяных паров $V_{o.H_2O}^h$	1,52
газов V_r^h	11,35

Таблица 2

Параметры и характеристики выносного экономайзера 3 МВт

Параметр	Значение
Номинальная тепловая мощность, МВт (Гкал/ч)	3 (2,58)
Температура воды на выходе из котла, °С, не более	95
Разность температур воды на входе и выходе из котла, °С, не менее	25
Расчетное (избыточное) давление воды на выходе из котла, МПа, не менее	0,7 (7,0)
Температура всасываемого воздуха, °С, не менее	10
Температура уходящих газов при номинальной теплопроизводительности, °С, не более	140
Значения КПД брутто котла при номинальных параметрах, %, не менее	94,0
Предельно допустимые габаритные размеры котла без учета выносного экономайзера, мм	4470×2170×2350
Предельно допустимые габаритные размеры выносного экономайзера, мм	3800×1200×1600

котла, который вместе со вспомогательным оборудованием должен быть размещен в ограниченных размерах БМК (табл. 2). Второе ограничение связано с обеспечением надежной длительной работы котла в условиях протекания низкотемпературной сернистой коррозии холодных поверхностей нагрева, которая имеет место при сжигании сернистой нефти.

Для выполнения поставленных требований принято решение использовать предвключенный выносной экономайзер, устанавливаемый над котлом (рис. 1).

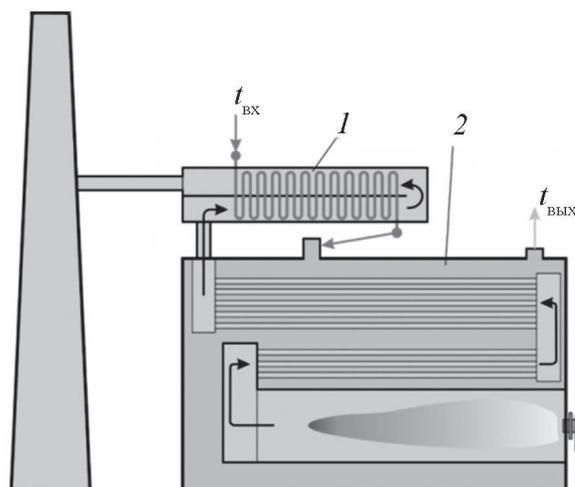


Рис. 1. Схема компоновки жаротрубного котла (2) с выносным водяным экономайзером (1)

Газовый тракт экономайзера перегородкой разделен на два хода. Продукты сгорания в поворотной камере, расположенной на конце экономайзера у фронта котла, разворачиваются и поступают к задней части котла, где через газоход выводятся наружу в дымовую трубу. Использование выносного экономайзера позволяет повысить температуру продуктов сгорания за котлом до 300...350 °С, уменьшить габариты котла и практически исключить низкотемпературную коррозию поверхностей теплообмена, расположенных в корпусе котла. Выносной экономайзер снижает затраты на обслуживание и замену элементов, подвергающихся коррозии, а также упрощает компоновку оборудования в БМК [2].

При разработке конструкции жаротрубного котла за основу принята схема с симметричным распределением дымогарных труб второго и третьего ходов по газам относительно оси жаровой трубы [3]. Размеры трубы определяли из условий отсутствия наброса факела на стенки и наиболее полного выгорания топлива [4, 5]. В результате конструкторских проработок и теплогидравлических расчетов предложена конструкция жарового котла, изображенная на рис. 2. Габаритные размеры котла — 4400×2000×2180 мм, его удельная металлоемкость с учетом экономайзера — 3587 кг/МВт.

Сырая нефть сжигается в разработанной для данного котла дутьевой малоэмиссионной горелке [6], которая

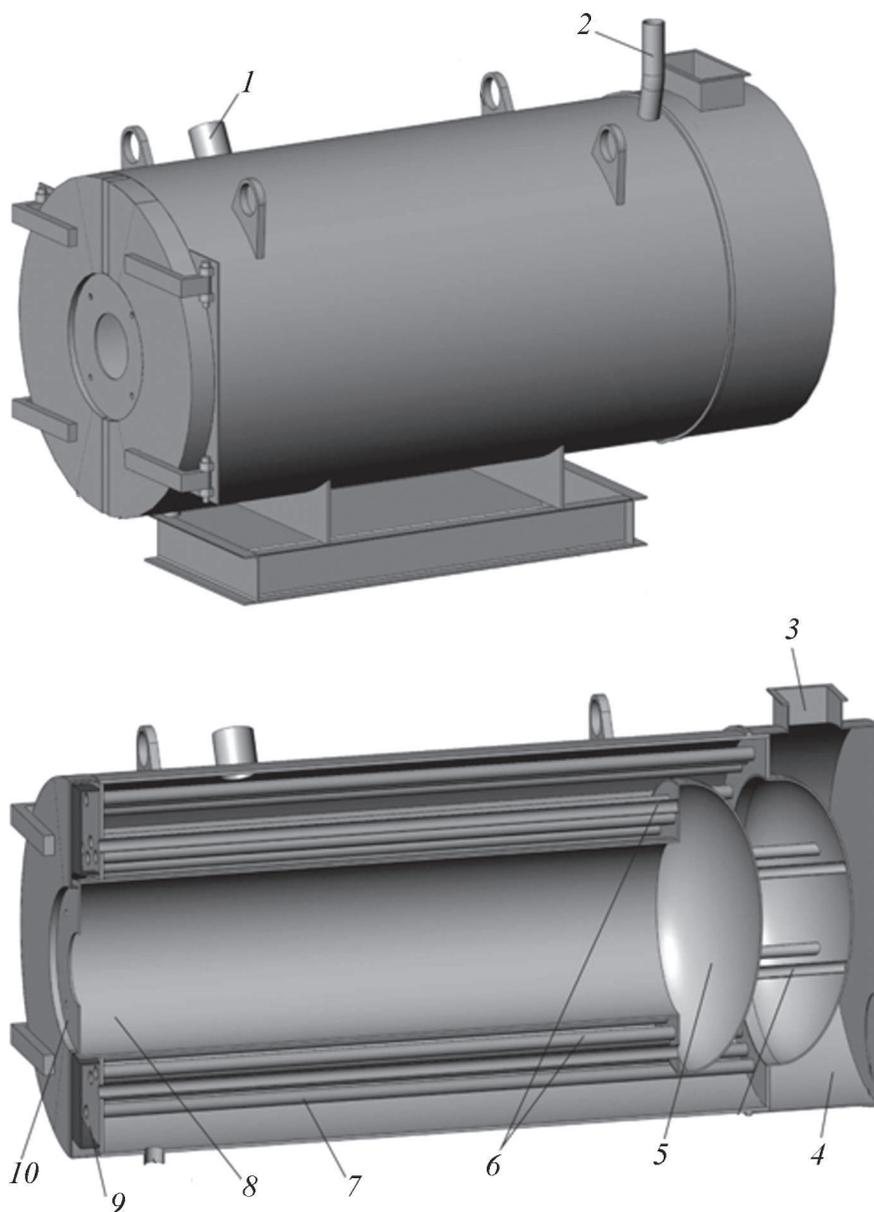


Рис. 2. Жаротрубный водогрейный котел:

1, 2 — отводящий и перепускной патрубки; 3 — перепускной газоход; 4 — выпускная камера; 5, 9 — первый и второй перепускные короба; 6, 7 — дымогарные трубы первого и второго ходов; 8 — жаровая труба; 10 — фланец

крепится к фланцу 10. Топка котла ограничена жаровой трубой 8 (внутренний диаметр 950 мм, длина 3200 мм) и первым перепускным коробом 5. Продукты сгорания после жаровой трубы поступают в первый перепускной короб, состоящий из эллиптического днища, цилиндрической обечайки и трубной доски, к которой приварены дымогарные трубы первого хода 6.

Из первого хода дымогарных труб 6 дымовые газы попадают во второй перепускной короб 9 и далее раздаются по дымогарным трубам второго хода 7, после которых собираются в выпускной камере 4. Затем они через перепускной газоход 3 направляются в корпус выносного экономайзера, который по газовой стороне разделен пластиной на два хода (см. рис. 1), пройдя их, продукты сгорания через газоход уходящих газов отводятся в дымовую трубу.

Подача воды с температурой 70 °С осуществляется на вход ВЭ, после нагрева она через перепускной патрубок 2 поступает в водяной объем жаротрубного котла. После нагрева в жаровом котле вода с требуемой температурой 95 °С отводится через отводящий патрубок 1.

После охлаждения в корпусе жарового котла до 280 °С продукты сгорания направляются в ВЭ. В процессе разработки учитывали, что выносной экономайзер должен располагаться над котлом в БМК и обеспечивать возможность доступа для обслуживания как ВЭ, так и водогрейного котла. Ограничение по габаритам ВЭ, которые не могли превышать габариты котла, привело к использованию плотного трубного пучка (рис. 3) и относительно высокому сопротивлению по тракту продуктов сгорания. При проектировании принято решение использовать конструкцию выносного экономайзера с внутренним расположением коллекторов, поскольку в этом случае обеспечивалась хорошая газоплотность корпуса ВЭ и дополнительный теплосъем. Габариты экономайзера составили 3640×1140×1330 мм, что существенно меньше данных технического задания (см. табл. 2).

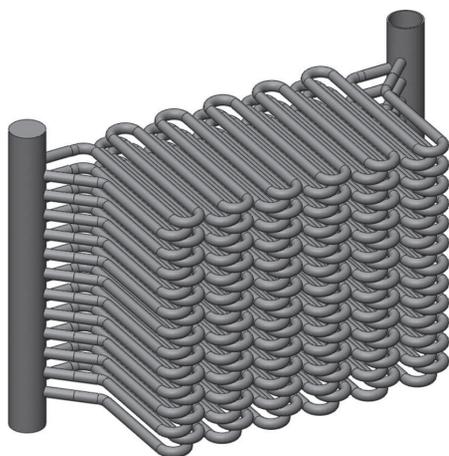


Рис. 3. Теплообменная поверхность выносного экономайзера

Для теплообменной поверхности экономайзера выбраны трубы с наружным диаметром 38 мм и толщиной стенки 4 мм. Использование труб меньшего диаметра значительно повышает вероятность заноса проходного сечения отложениями, а использование труб большего диаметра существенно увеличит габариты теплообменной поверхности. Количество параллельно включенных труб определяли из условия обеспечения массовой скорости воды в трубах не менее 1200 кг/(м²·с), что является минимально допустимым значением по условиям предотвращения заноса труб отложениями [7]. Высокие скорости среды необходимы в связи с более низким качеством сетевой воды в водогрейных котлах по сравнению с паровыми. Особенно это актуально для котлов, работающих по открытой схеме.

Результаты теплогидравлических расчетов, выполненных с применением программного комплекса Boiler Designer [8] для рабочего диапазона нагрузок (от 40 до 100% от номинальной), приведены в табл. 3, а основные конструктивные характеристики выносного экономайзера — в табл. 4.

Одновременно с разработкой котла велись работы по созданию для него горелочного устройства. В соответствии с поставленной задачей устройство должно обеспечивать устойчивое воспламенение, полное выгорание сырой нефти в стесненном объеме жаровой трубы с минимальным химическим недожогом в рабочем диапазоне нагрузок котла от 40 до 100% от номинальной и пониженную эмиссию оксидов азота.

В основу предложенной конструкции горелки положен принцип стадийно-ступенчатого сжигания топлива [9]. Концепция заключалась в организации дополни-

Таблица 3

Результаты теплогидравлического расчета жаротрубного котла и выносного экономайзера

Параметр	Значение	
	100	40
Нагрузка (от номинальной), %	100	40
Тепловая мощность котла, МВт	3,00	1,2
Расход топлива, т/ч	0,2877	0,1128
Коэффициент избытка воздуха	1,15	1,15
Расход воды в котле, т/ч	103,2	103,2
КПД котла, %	94,8	96,7
Температура газов, °С		
на выходе из котла	217,3	144,2
на выходе из выносного экономайзера	135,6	93,6
Температура воды, °С		
на входе в выносной экономайзер	70	70
на выходе из выносного экономайзера	71	70,2
на выходе из котла	95	80
Сопротивление элементов по газовому тракту, Па		
котла	547	76
выносного экономайзера	347	58

Таблица 4

Конструктивные характеристики выносного экономайзера

Характеристика	Значение
Снимаемое тепло в ВЭ, МВт	0,119
Число параллельно включенных труб, шт.	24
Количество труб в ряду	12
Количество рядов труб	24
Площадь поверхности, м ²	29,22
Масса теплообменной поверхности, кг	811
Массовая скорость воды, кг/(м ² ·с)	1690
Гидравлическое сопротивление, МПа: выносного экономайзера котла	0,025 0,013

тельных воздушных потоков в различные зоны горения топлива для улучшения условий его выгорания и снижения эмиссии оксидов азота. С целью оптимизации конструкции разработаны компьютерные модели различных вариантов горелок и проведены численные эксперименты с использованием CFD-методов [10 — 13] (программный комплекс ANSYS) по исследованию процессов распыла, воспламенения, выгорания топлива и эмиссии оксидов азота NO_x и СО в зависимости от конструктивных и режимных параметров [6].

Результаты исследований выглядят как массивы данных, на базе которых для оценки работы горелочного устройства проводили:

- анализ скоростных, температурных и концентрационных (топливо, O₂, СО, СО₂, NO) полей;
- определение объемных областей факела с температурой не менее 1250 °С, в которых происходило практически полное выгорание топлива;

- вычисление высокотемпературных объемных зон факела с температурой газов не менее 1500 °С, характеризующих образование термических оксидов азота;
- изучение температур и концентраций вредных веществ (NO, СО) на выходе из жаровой трубы.

Поставленные численные эксперименты позволили предложить оптимальную конструкцию комбинированного горелочного устройства с двумя отверстиями в центральном диске-диффузоре, обеспечивающую надежную работу на всех исследуемых топливах с низкой эмиссией оксидов азота (рис. 4).

Конструкция горелки обеспечивает последовательный подвод воздуха (рис. 5) в конус распыла жидкого топлива в следующих соотношениях: через центральное отверстие в диске (20,4% от общего количества воздуха), через радиальные прорези и отверстия в секторах диска (15,9%) и закрученным потоком по периферии (63,7%).

Таким образом, реализовано постепенное увеличение величин локальных избытков воздуха в зонах воспламенения и активного горения. Данные условия, с учетом полидисперсности капель сырой нефти и разных скоростей их прогрева и выхода паровой фазы из жидких капель, обеспечивают благоприятные условия для выгорания топлива.

Проведенные численные эксперименты показали, что на всех нагрузках в центральной области располагаются устойчивые симметричные зоны обратных токов (ЗОТ), ответственные за воспламенение сырой нефти (рис. 6) [14 — 16]. На номинальной нагрузке воспламенение происходит как по внутренней, так и по наружной границам конуса распыла. С понижением нагрузки воспламенение на внешней границе конуса распыла прекращается и смещается только на внутреннюю границу (рис. 7). Это объясняется тем, что

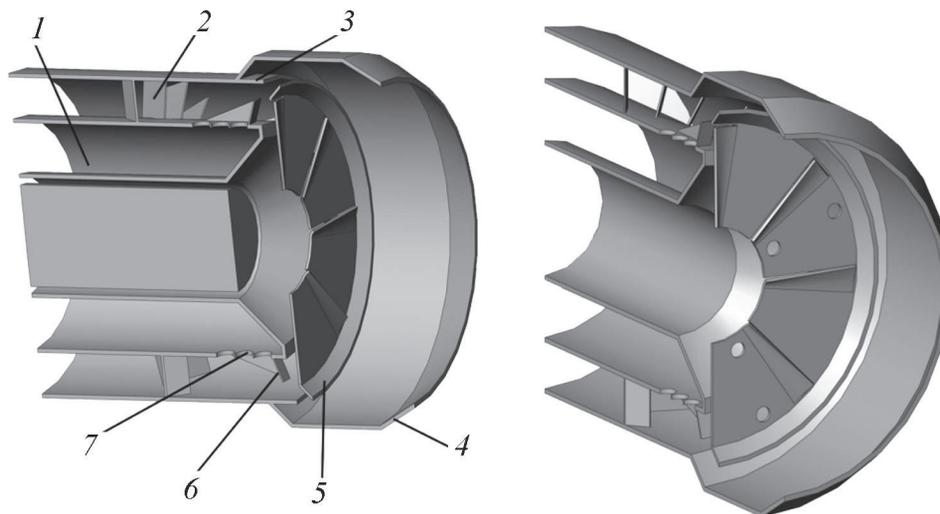


Рис. 4. Конструкция малоэмиссионной горелки для жаротрубного котла:

1 — коллектор раздачи газа; 2 — лопатки для закрутки воздуха; 3 — регулировочное кольцо; 4 — удлинение горелочной головки; 5 — перфорированный диск; 6 — обтекатель для защиты газовых струй от сносящего потока; 7 — отверстия для раздачи газа в поток воздуха

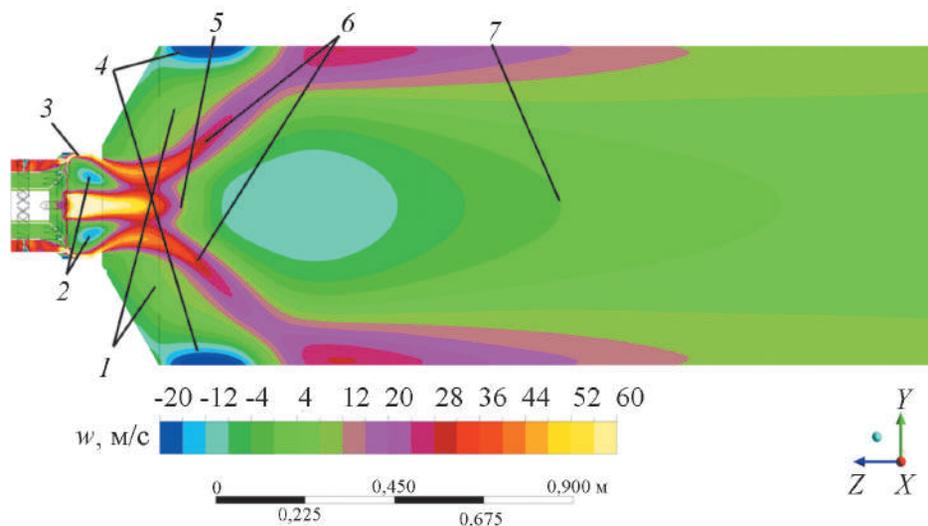


Рис. 5. Схема течений в вихревой горелке:

1, 4 — периферийные зоны воспламенения и обратных токов; 2 — зона обратных токов в диффузоре; 3 — предкамерный поток; 5 — центральная зона воспламенения; 6 — фронт пламени; 7 — задняя критическая точка

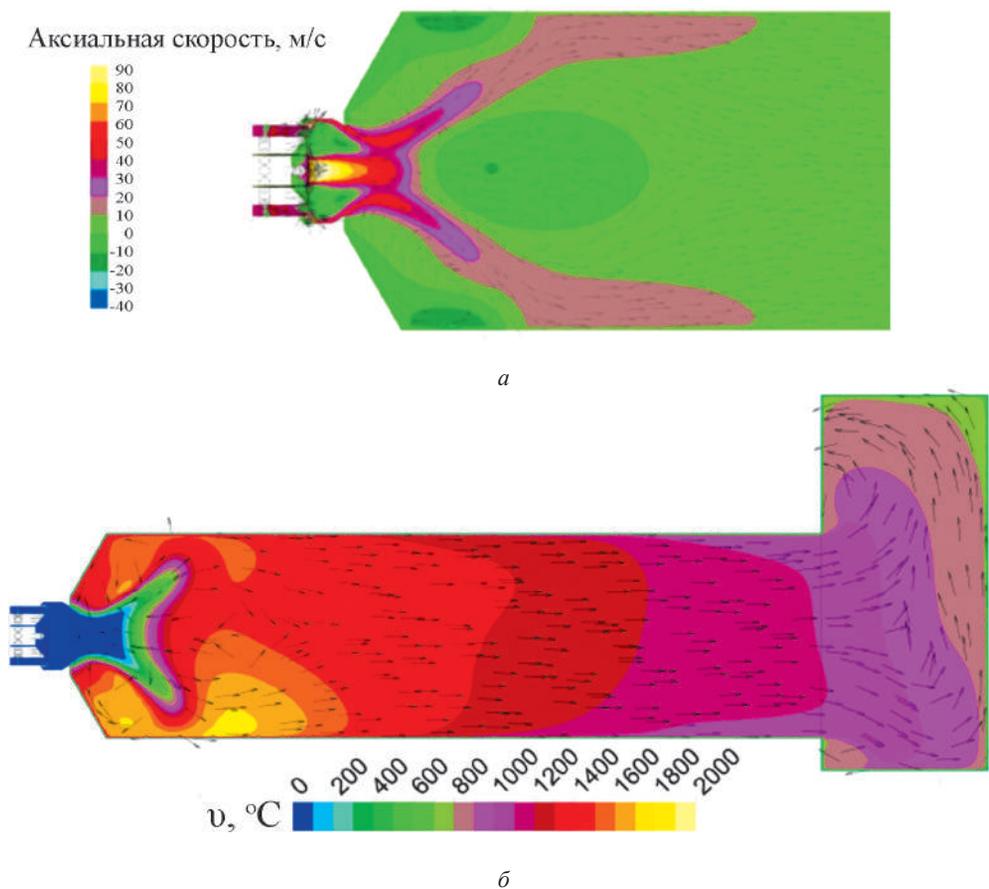


Рис. 6. Поля аксиальной скорости в зоне обратных токов (а) и температур в жаровой трубе (б) при сжигании сырой нефти при номинальной нагрузке

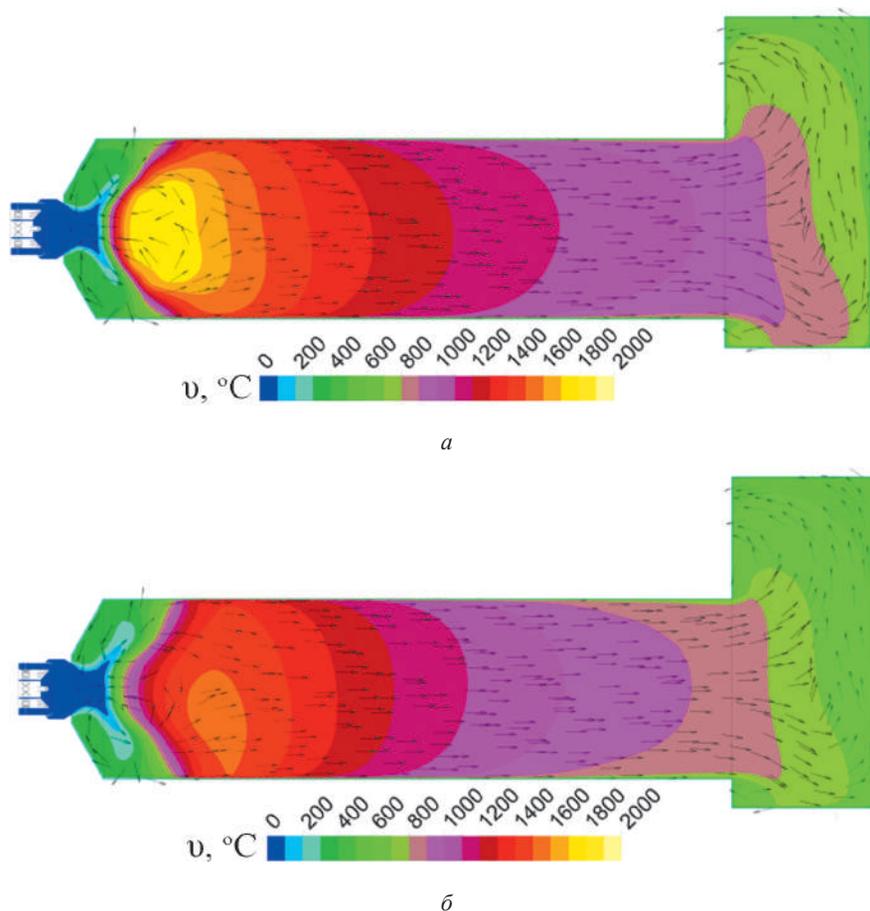


Рис. 7. Поля температур в жаровой трубе при сжигании сырой нефти в зависимости от нагрузки 60 (а) и 40% (б)

более крупные капли нефти не успевают прогреваться и испаряться на наружной границе, где температуры рециркулирующих газов ниже, чем в ЗОТ по центру жаровой трубы.

Следовательно, расчетные исследования подтвердили, что предложенное горелочное устройство обеспечивает устойчивое воспламенение и практически полное выгорание сырой нефти во всем диапазоне рабочих нагрузок от 40 до 100% от номинальной. Кроме того, за счет реализации стадийно-ступенчатого сжигания удалось уменьшить максимальные температуры газов в зоне активного горения, что увеличило надежность работы металла жаровой трубы, и снизить эмиссию оксидов азота NO во всем рабочем диапазоне нагрузок. Снижение выхода NO на номинальной нагрузке составило 12% по сравнению с зарубежными аналогами, при этом температуры газов на выходе из поворотной камеры сохранились на достаточном уровне, обеспечившем хорошие условия для полного выгорания топлива.

Эмиссия оксидов азота во всем диапазоне рабочих нагрузок при сжигании жидких топлив располагается в диапазоне 74...106 ppm и не превышает установленных значений для водогрейных котлов мощностью до 4 МВт класса II при сжигании легких жидких топлив [7].

Детальный анализ результатов численных экспериментов, выполненных для данной горелки на разных нагрузках, показал, что предложенная конструкция обеспечивает оптимальные условия для протекания рабочих процессов в жаровой трубе во всем диапазоне рабочих нагрузок и имеет существенные преимущества по сравнению с известными зарубежными аналогами.

Изготовленное по результатам эскизного проектирования горелочное устройство дано на рис. 8. Результаты испытаний горелки в целом подтвердили ее показатели (рис. 9).

Рабочее проектирование и создание разработанного в НИУ «МЭИ» котла выполнено на Ижевском котельном заводе «Arcus» (рис. 10).

В процессе проведенных теплотехнических испытаний котла подтверждено соответствие его фактических рабочих параметров проектным показателям. Фактический КПД котла в период испытаний на всех нагрузках превышал 94%, что соответствует поставленному техническому заданию. Принятые в процессах эскизного и рабочего проектирования конструкторско-технологические и технические решения обеспечили работу водогрейного котла с выносным экономайзером с заданными рабочими показателями.

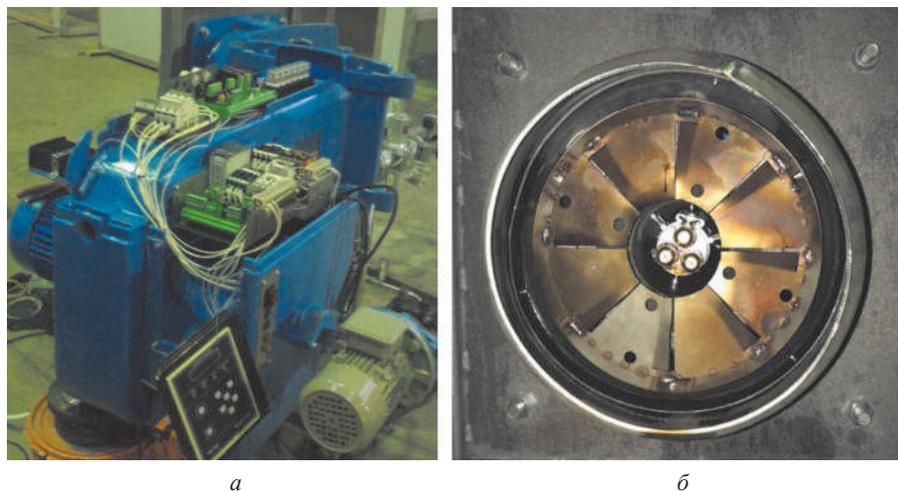


Рис. 8. Горелочное устройство в сборе (а) и вид на перфорированный диск-диффузор (б)



Рис. 9. Горелка на испытательном стенде

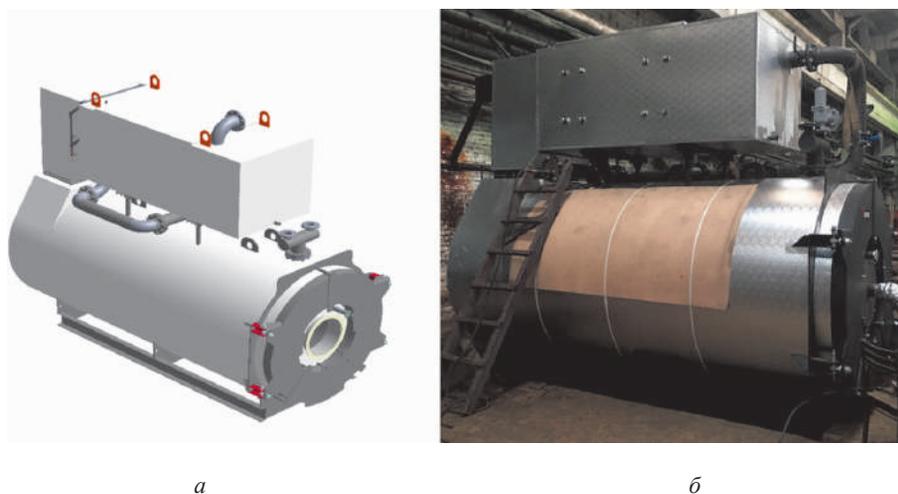


Рис. 10. Макет (а) и изображение (б) заводской модели котла

Таким образом, для повышения эффективности и надежности работы котлов малой мощности, работающих на сырой нефти, предложена альтернативная конструкция энергоэффективного жаротрубного котла с выносным водяным экономайзером, допускающая его размещение и эксплуатацию в блочно-модульной котельной.

Предложена конструкция выносного экономайзера с внутренним расположением коллекторов, предусматривающая его расположение над котлом и обеспечивающая возможность доступа для обслуживания как выносного экономайзера, так и водогрейного котла.

Выполненные теплогидравлические расчеты котла показали, что предложенная конструкция обеспечивает КПД котла не менее 94% в рабочем диапазоне нагрузок и предотвращает низкотемпературную коррозию элементов непосредственно в корпусе котла.

На основании численных экспериментов разработано новое горелочное устройство для ступенчато-ста-

дийного сжигания сырой нефти, обладающее преимуществами по сравнению с зарубежными аналогами, в частности, пониженным на 10...15% уровнем эмиссии оксидов азота.

Проведенные заводские испытания подтвердили высокую эффективность и КПД более 94% на всех режимах сжигания сырой нефти.

Испытания горелки доказали результативность воспламенения и горения сырой нефти и пониженный уровень эмиссии вредных продуктов сгорания по сравнению с зарубежными аналогами.

Разработанный высокоэффективный и экологически чистый котел может быть с успехом использован в блочно-модульных котельных на предприятиях ПАО «АК «Транснефть», а также при освоении районов Крайнего Севера, где имеется дефицит традиционных энергетических топлив.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электрон. ресурс] <http://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 06.02.2018).
2. Росляков П.В., Проскурин Ю.В., Ионкин И.Л., Стерхов К.В. Разработка энергоэффективных решений для малогабаритного водогрейного котла // Промышленная энергетика. 2017. № 3. С. 25—32.
3. Росляков П.В., Проскурин Ю.В., Плешанов К.А., Ионкин И.Л. Технические решения для малогабаритного водогрейного котла // Промышленная энергетика. 2017. № 8. С. 44—51.
4. Плешанов К.А., Палагин Г.В. Тепловой расчет жаротрубного котла // Информатизация инженерного образования: Труды Междунар. науч.-практ. конф. М.: Издат. дом МЭИ, 2016. С. 394—398.
5. Хаустов С.А., Заворин А.С. Дальнобойность факела в жаровых трубах котлов // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С. 16—20.
6. Росляков П.В., Проскурин Ю.В., Хохлов Д.А. Разработка комбинированного малоэмиссионного горелочного устройства для котлов малой мощности // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 31—42.
7. ГОСТ 30735—2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт. Общие технические условия.
8. Плешанов К.А., Стерхов К.В. Расчет циркуляции котла-утилизатора ПР-76-3.3-415 // Boiler Designer-2014: Труды Междунар. науч.-практ. конф. М.: Торус Пресс, 2014. С. 77—82.
9. Росляков П.В. Современные воздухоохранные технологии на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 46—62.
10. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flow // Computer Methods in Appl. Mech. and Eng. 1974. No. 3. Pp. 269—289.
11. Carvalho M.G., Farias T., Fontes P. Predicting Radiative Heat Transfer in Absorbing, Emitting, and

References

1. Energeticheskaya Strategiya Rossii na Period do 2030 Goda [Elektron. Resurs] <http://minenergo.gov.ru/node/1026> (Data Obrashcheniya 06.02.2018). (in Russian).
2. Roslyakov P.V., Proskurin Yu.V., Ionkin I.L., Sterhov K.V. Razrabotka Energoeffektivnyh Resheniy dlya Malogabaritnogo Vodogreynogo Kotla. Promyshlennaya Energetika. 2017;3:25—32. (in Russian).
3. Roslyakov P.V., Proskurin Yu.V., Pleshanov K.A., Ionkin I.L. Tekhnicheskie Resheniya dlya Malogabaritnogo Vodogreynogo Kotla. Promyshlennaya Energetika. 2017;8: 44—51. (in Russian).
4. Pleshanov K.A., Palagin G.V. Teplovoy Raschet Zharotrubnogo Kotla. Informatizatsiya Inzhenernogo Obrazovaniya: Trudy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. M.: Izdat. Dom MPEI, 2016:394—398. (in Russian).
5. Haustov S.A., Zavorin A.S. Dal'noboynost' Fakela v Zharovyh Trubah Kotlov. Promyshlennaya Energetika. 2014;10:16—20. (in Russian).
6. Roslyakov P.V., Proskurin Yu.V., Khohlov D.A. Razrabotka Kombinirovannogo Maloemissionnogo Gorelochnogo Ustroystva Dlya Kotlov Maloy Moshchnosti. Teploenergetika. 2017;8:31—42. (in Russian).
7. GOST 30735—2001. Kotly Otopitel'nye Vodogreynye Teploproizvoditel'nost'yu ot 0,1 do 4,0 MVt. Obshchie Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
8. Pleshanov K.A., Sterhov K.V. Raschet Tsirkulyatsii Kotla-utilizatora PR-76-3.3-415. Boiler Designer-2014: Trudy Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. M.: Torus Press, 2014:77—82. (in Russian).
9. Roslyakov P.V. Sovremennye Vozduhoohrannye Tekhnologii na Teplovyh Elektrostantsiyah. Teploenergetika. 2017;10:46—62. (in Russian).
10. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flow. Computer Methods in Appl. Mech. and Eng. 1974;3:269—289.
11. Carvalho M.G., Farias T., Fontes P. Predicting Radiative Heat Transfer in Absorbing, Emitting, and Scattering

Scattering Media Using the Discrete Transfer Method // ASME HTD. Fundamentals of Radiation Heat Transfer. 1991. No. 160. Pp. 17—26.

12. **Chui E.H., Raithby G.D., Chui E.H.** Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-orthogonal Mesh Using the Finite-volume Method // Numerical Heat Transfer. 1993. V. 3. No. 23. Pp. 269—288.

13. **Schmidt D.P. e. a.** Pressure-swirl Atomization in the Near Field // Proc. Intern. Congress and Exposition. Detroit, 1999. Pp. 1—17.

14. **Хаустов С.А., Заворин А.С.** Аэродинамическая структура топочной среды в жаровых трубах с реверсивным факелом // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. Т. 92. № 6. С. 63—67.

15. **Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.** Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Изд-во Инс-та теплофизики СО РАН, 2003.

16. **Хаустов С.А., Заворин А.С., Фисенко Р.Н.** Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом // Известия Томского политехн. ун-та. 2013. Т. 322. № 4. С. 43—47.

Media Using the Discrete Transfer Method. ASME HTD. Fundamentals of Radiation Heat Transfer. 1991;160:17—26.

12. **Chui E.H., Raithby G.D., Chui E.H.** Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-orthogonal Mesh Using the Finite-volume Method. Numerical Heat Transfer. 1993;3;23: 269—288.

13. **Schmidt D.P. e. a.** Pressure-swirl Atomization in the Near Field. Proc. Intern. Congress and Exposition. Detroit, 1999:1—17.

14. **Haustov S.A., Zavorin A.S.** Aerodinamicheskaya Struktura Topchnoy Sredy v Zharovyh Trubah s Reversivnym Fakelom. Energoberezhenie i Vodopodgotovka. 2014;92;6:63—67. (in Russian).

15. **Alekseenko S.V., Kuybin P.A., Okulov V.L.** Vvedenie v Teoriyu Kontsentririvannyh Vihrey. Novosibirsk: Izd-vo Ins-ta Teplofiziki SO RAN, 2003. (in Russian).

16. **Haustov S.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N.** Chislennoe Issledovanie Protsesov v Zharotrubnoy Topke s Reversivnym Fakelom. Izvestiya Tomskogo Politekhn. Un-ta. 2013;322;4:43—47. (in Russian).

Сведения об авторах:

Росляков Павел Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: RoslyakovPV@mpei.ru

Гриша Бронислав Геннадиевич — начальник службы по сопровождению внешних проектов ООО «НИИ Транснефть», e-mail: grishabg@niitnn.transneft.ru

Ионкин Игорь Львович — кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ»

Зайченко Михаил Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: ZaichenkoMN@mpei.ru

Information about authors:

Roslyakov Pavel V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: RoslyakovPV@mpei.ru

Grisha Bronislav G. — Head of External Project Support Service of the Pipeline Transport Institute (PTI, LLC), e-mail: grishabg@niitnn.transneft.ru

Ionkin Igor L. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI

Zaichenko Mikhail N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: ZaichenkoMN@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 14.03.2018

The article received to the editor: 14.03.2018