

## ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В ОБЪЕМЕ ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА С НЕВОДЯНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В статье предложено решение проблем, связанных с высокотемпературным нагревом. Приведены основные преимущества высокотемпературных теплоносителей. Дано описание конструкции жаротрубного котла и его основных составляющих (топки и конвективного пучка). Рассмотрен процесс работы жаротрубного котла. Описана методика теплового расчета котла в соответствии с нормативным методом. Дана характеристика свободной и вынужденной конвекции и критериям, описывающим эти процессы. Представлены критериальные уравнения, характеризующие теплообмен при вынужденной и свободной конвекции для жаротрубного котла. По результатам расчетного эксперимента построены графики зависимости безразмерной величины при свободной и вынужденной конвекции от температуры теплоносителя.

**Ключевые слова:** высокотемпературный теплоноситель, жаротрубный котел, свободная конвекция, вынужденная конвекция, критерий Нусельта, неводной теплоноситель.

На сегодняшний день на территории нашей страны повсеместно используются котлы жаротрубного типа. В качестве теплоносителя в этих котлах широкое применение нашла вода благодаря её широкой распространённости в природе и особым термодинамическим свойствам, связанным со строением молекул. Но при атмосферном давлении воду можно нагреть только до 100 °С, при дальнейшем нагреве мы будем получать пар, все термодинамические свойства которого значительно отличаются от жидкости. Чтобы нагреть воду до более высоких температур, необходимо значительно повышать давление в системе.

В жаротрубных котлах режим течения воды в зоне нагрева у жаровой трубы близок к ламинарному, конструкция котлов предполагает наличие застойных зон либо зон с невысокой скоростью движения. В таких зонах течение воды осуществляется в основном за счет свободной конвекции, что чревато уменьшением теплопередающей способности, вскипанием жидкости и местным перегревом металла. Комплексным решением этих проблем может стать применение высокотемпературных теплоносителей вместо воды.

Общей характеристикой для всех высокотемпературных теплоносителей является их высокая температура кипения или высокая температура, при которой начнется дистилляция (в случае минеральных масел). Следовательно, их можно использовать при высоких температурах в жидкой фазе под атмосферным давлением. Максимальная температура использования колеблется в интервале от 170 до 350 °С [1, 2].

Замена теплоносителя может существенно повлиять на теплообмен в котельной установке. В свя-

зи с этим возникает необходимость в исследовании и сравнении процессов теплообмена в котлах с высокотемпературным и водяным теплоносителями.

Условно жаротрубный котел можно разделить на три зоны: топочная камера (жаровая труба), конвективный пучок труб и жидкостный объем котла.

Жаротрубные котлы имеют, как правило, теплоизолированный цилиндрический корпус, расположенный горизонтально и заполненный теплоносителем (жидкостный объем котла). Внутри корпуса расположена жаровая труба, выполняющая функции топки. Передача теплоты от факела и продуктов горения к стенам жаровой трубы осуществляется преимущественно путем излучения. Пройдя жаровую трубу, продукты горения, отдав теплоту воде, направляются в конвективный пучок труб. В жаровой трубе таких котлов осуществляется радиационный теплообмен, а конвективный теплообмен — в трубах небольшого диаметра, через которые с достаточно большой скоростью проходят продукты горения топлива [3–5]. Схематичная конструкция жаротрубного котла представлена на рис. 1.

Расчет теплообмена в топке жаротрубного котла основывается на нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов. В этом методе для расчета теплообмена в однокамерных топках рекомендуется формула, связывающая безразмерную температуру продуктов сгорания на выходе из топки ( $\theta_m''$ ) с критерием Больцмана ( $Bo$ ), степенью черноты топки ( $a_m$ ) и параметром ( $M$ ), учитывающим характер распределения температур по высоте топки [6]:

$$\theta_m'' = \frac{T_m''}{T_a} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot a_m^{0,6} + Bo^{0,6}}.$$

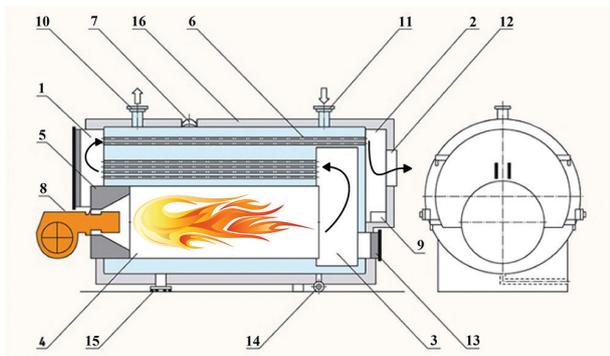


Рис. 1. Схема жаротрубного котла

с трехходовым движением продуктов горения:

- 1 — поворотная камера; 2 — коллекторная камера дымовых газов; 3 — отражатель; 4 — жаровая труба; 5 — горелочная плита с обмуровкой; 6 — дымогарные трубы; 7 — люк-лаз; 8 — горелка; 9 — люк для очистки; 10 — патрубок для выхода теплоносителя; 11 — патрубок для входа теплоносителя; 12 — патрубок дымохода; 13 — взрывной люк; 14 — дренаж и циркуляция; 15 — стойки; 16 — изоляция

В общем виде тепловосприятие поверхностей нагрева в топке определяется из уравнения теплообмена в топке, которое, исходя из закона Стефана — Больцмана, может быть представлено в виде:

$$Q'_A = \alpha_T \cdot c_0 \cdot \psi_s \cdot F_{cm} (T^4 - T_{cm}^4) \cdot 10^{-3},$$

где  $Q'_A$  — тепловосприятие поверхности нагрева;  $\alpha_T$  — интегральный коэффициент теплового излучения топки;  $c_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\psi_s$  — коэффициент тепловой эффективности поверхности нагрева;  $F_{cm}$  — площадь поверхности стенок, ограничивающих топку;  $T$  — средняя температура продуктов сгорания в топке;  $T_{cm}^4$  — средняя температура поверхности нагрева.

Суммарное количество теплоты, переданное в топке:

$$Q_{сум} = Q_k + Q_A,$$

где  $Q_A$  — количество теплоты, переданное излучением;  $Q_k$  — количество теплоты, переданное конвекцией.

При расчете конвективных поверхностей нагрева используется уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса.

Уравнение теплопередачи:

$$Q_m = K \cdot H \cdot \Delta t / B_p,$$

Уравнение теплового баланса:

$$Q_b = \phi(I' - I'').$$

В этих уравнениях  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t$  — температурный напор, °С;  $B_p$  — расчетный расход топлива, м<sup>3</sup>/с;  $H$  — расчетная поверхность нагрева, м<sup>2</sup>;  $\phi$  — коэффициент сохранения теплоты;  $I'$ ,  $I''$  — энтальпии продуктов сгорания на входе в поверхность нагрева и на выходе из нее, кДж/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплопередачи в конвективном пучке труб:

$$K = \frac{\psi \cdot \alpha_{n.r} \cdot \alpha_{ж}}{\alpha_{n.r} + \alpha_{ж}},$$

где  $\alpha_{n.r}$  — коэффициент теплоотдачи со стороны продуктов горения;  $\alpha_{ж}$  — коэффициент теплоотдачи со стороны жидкого теплоносителя;  $\psi$  — коэффициент тепловой эффективности [7].

В жидкостном объеме жаротрубного котла наблюдаются конвективные явления. Движение жидкости происходит за счет перемещения масс, посредством внешних сил или диффузии, а зачастую за счет того и другого.

Существует два основных вида конвективного теплообмена:

- естественная конвекция;
- вынужденная конвекция.

Естественная конвекция, или свободная конвекция, происходит из-за разницы плотностей слоев вещества, возникающей под действием температурного расширения среды. Более нагретые слои вещества (менее плотные), находящиеся у нагретых поверхностей теплообмена (топка и конвективный пучок труб котла), поднимаются, в то время как менее нагретые слои (более плотные) опускаются, что приводит к объемному движению вещества.

Естественная конвекция в жидкостном объеме котла будет протекать более интенсивно при большей разности плотностей слоев среды и большем ускорении свободного падения. Однако увеличение диффузии в объеме вещества, а также высокая вязкость среды вызовет ухудшение естественной конвекции.

Одним из параметров, характеризующих естественную конвекцию, является число Грасгофа ( $Gr$ ). Оно представляет собой безразмерную величину в гидрогазодинамике и теплообмене, которая приблизительно равна отношению архимедовой выталкивающей силы к вязкости вещества.

Вынужденная конвекция — это перенос тепла частицами вещества под действием внешних сил, направленных на перемещение этого вещества, и возникает при наличии внешнего циркуляционного контура с насосом. Вынужденная конвекция гораздо более эффективна в отличие от естественной, так как она мало зависит от ускорения свободного падения или увеличения диффузии в объеме вещества. Высокая вязкость ухудшает вынужденную конвекцию, так как уменьшается турбулизация потока, а также возрастают гидравлические потери на трение.

Параметром, характеризующим интенсивность вынужденной конвекции, является критерий Рейнольдса ( $Re$ ). Это безразмерная величина, характеризующая отношение сил инерции к вязкости, она также характеризует переход от ламинарного течения к турбулентному. Вязкость слоев вещества поглощает избыточную (турбулентную) составляющую скорости, в то время как силы инерции, наоборот, поддерживают и являются источником дестабилизирующего воздействия на слои вещества [8].

В расчетах параметром, характеризующим конвективный теплообмен, является коэффициент теплоотдачи. Он зависит от числа Нуссельта ( $Nu$ ), поэтому при исследовании процессов конвективного теплообмена, возможно, вместо коэффициента теплоотдачи использовать число Нуссельта.

При вынужденном поперечном обтекании органическими теплоносителями одиночной трубы (топки) теплоотдачу следует определять по формулам:

$$Nu = 0,59 Re_m^{0,47} Pr_m^{0,38} (Pr_m / Pr_{cm})^{0,25} \epsilon_\phi,$$

при  $Re = 10 \div 1000$  и

$$Nu = 0,21Re_m^{0,62} Pr_m^{0,38} (Pr_m/Pr_{cm})^{0,25} \varepsilon_\phi,$$

при  $Re = 10^3 \div 2 \cdot 10^5$ .

При вынужденном поперечном обтекании органическими теплоносителями пучка труб рекомендуется пользоваться формулами:

$$Nu = 0,23Re_m^{0,65} Pr_m^{0,33} (Pr_m/Pr_{cm})^{0,25} \varepsilon_\phi,$$

— при коридорном расположении труб в пучке;

$$Nu = 0,41Re_m^{0,6} Pr_m^{0,33} (Pr_m/Pr_{cm})^{0,25} \varepsilon_\phi,$$

— при шахматном расположении труб в пучке.

В приведенных выше формулах  $Re_m$  — критерий Рейнольдса теплоносителя,  $Pr_m$  — критерий Прантля теплоносителя,  $Pr_{cm}$  — критерий Прантля теплоносителя при температуре стенки теплопередающей поверхности,  $\varepsilon_\phi$  — коэффициент, зависящий от угла атаки [9, 10].

Теплообмен при естественной конвекции в большом объеме для высокотемпературных органических теплоносителей довольно хорошо описывается критериальным уравнением:

$$Nu = CGr^m Pr^n,$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные, принимаемые в зависимости от величины критерия  $Gr$ :

$Gr$	$c$	$m$
$10^2 - 10^9$	0,52	1/4
$10^9 - 10^{12}$	0,105	1/8

Показатель степени  $n$  определяется по уравнению [9]:

$$n = 0,3 + \frac{0,02}{Pr_{cp}^{1/3}}.$$

По результатам расчетного исследования были определены критерии Нусельта для воды и высокотемпературного теплоносителя (АТМ-300) при свободной и вынужденной конвекции. Построены графики зависимости безразмерной величины  $Nu_{в.м.}/Nu_{вода}$  при свободной (рис. 2) и вынужденной (рис. 3) конвекции от температуры теплоносителя ( $Nu_{в.м.}$ ,  $Nu_{вода}$  — критерии Нусельта для высокотемпературного теплоносителя и воды соответственно).

Из графиков видно, что с увеличением температуры критерий Нусельта для высокотемпературного теплоносителя увеличивается более интенсивно, чем для воды. Причем для свободной конвекции этот рост более стремительный. Это объясняется тем, что с повышением температуры высокотемпературного теплоносителя значительно уменьшается его кинематическая вязкость. У воды же кинематическая вязкость уменьшается незначительно. В интервале температур  $20 - 260$  °С вязкость воды уменьшается примерно в 7,5 раза, когда вязкость масла АТМ-300 уменьшается в 240 раз.

Значения  $Nu_{в.м.}$  при температурах  $135$  °С для свободной конвекции и  $175$  °С для вынужденной будут равны значениям  $Nu_{вода}$ . С дальнейшим повышением температуры число Нусельта для высокотемпературного теплоносителя будет превышать число Нусельта для воды (т.е.  $Nu_{в.м.}/Nu_{вода} > 1$ ). Напротив, при значениях  $Nu_{в.м.}/Nu_{вода} < 1$  использование воды

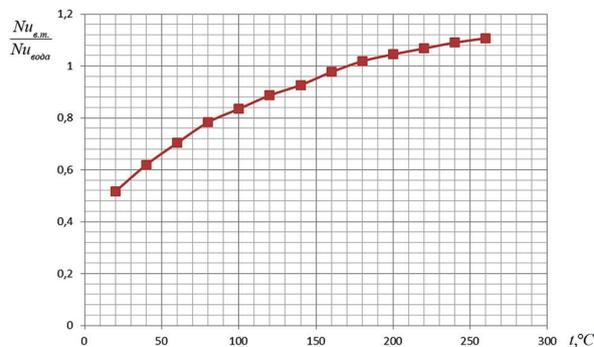


Рис. 2. График зависимости безразмерной величины  $Nu_{в.м.}/Nu_{вода}$  при вынужденной конвекции от температуры теплоносителя

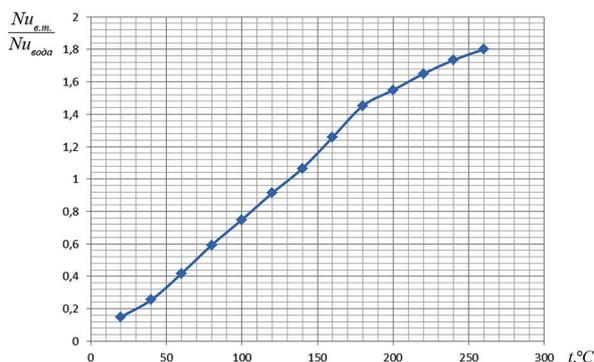


Рис. 3. График зависимости безразмерной величины  $Nu_{в.м.}/Nu_{вода}$  при свободной конвекции от температуры теплоносителя

в качестве теплоносителя обеспечит наибольшие значения коэффициента теплоотдачи.

По результатам исследования можно сделать вывод, что применение высокотемпературных теплоносителей в жаротрубных котлах имеет место, особенно при высокотемпературном нагреве. Так как в жидкостном объеме жаротрубного котла режим течения воды у поверхностей нагрева близок к ламинарному, передача теплоты к теплоносителю происходит преимущественно за счет свободной конвекции. Следовательно, уже при температурах высокотемпературного теплоносителя выше  $135$  °С котел будет работать эффективно.

#### Библиографический список

1. Сидельковский Л. Н., Юренев В. Н. Котельные установки промышленных предприятий. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 528 с. ISBN 5-283-00016-8.
2. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Мастерских Н. А. Вопросы использования высокотемпературных теплоносителей в газотрубных котлах // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. Пенза: Наука и Просвещение. 2016. С. 50–53.
3. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Жуңда А. С., Мухаметшина Е. А. Особенности использования высокотемпературных теплоносителей в жаротрубных котлах // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XII Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. Пенза: Наука и Просвещение, 2017. С. 124–126.
4. Брюханов О. Н., Кузнецов В. А. Газифицированные котельные агрегаты. М.: ИНФРА-М, 2005. 392 с. ISBN 5-16-002442-5.

5. Annaratone D. Steam Generators. Description and design. Heidelberg: Springer Berlin, 2008. 427 p. ISBN 978-3-540-77715-1.
6. Зах Р. Г. Котельные установки. М.: Энергия, 1968. 352 с.
7. Кузнецов Н. В., Митор В. В., Дубровский И. Е. [и др.]. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1973. 296 с.
8. Вдовин О. В., Мастерских Н. А., Михайлов А. Г. Оценка естественной и вынужденной конвекции высокотемпературных теплоносителей // Европейские научные исследования: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. Пенза: Наука и Просвещение. 2016. С. 34–37.
9. Чечеткин А. В. Высокотемпературные теплоносители. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1971. 496 с.
10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.

**МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теплоэнергетика».  
SPIN-код: 7337-8036  
AuthorID (РИНЦ): 385534

**ВДОВИН Олег Владиславович**, магистрант гр. ТЭМ-171 факультета элитного образования и магистратуры.  
SPIN-код: 8721-5737  
AuthorID (РИНЦ): 939315  
**СЛОБОДИНА Екатерина Николаевна**, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика».  
SPIN-код: 3785-9045  
AuthorID (РИНЦ): 763109  
Адрес для переписки: oleg95\_15.03@mail.ru

#### Для цитирования

Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Процессы теплообмена в объеме жаротрубного котла с неводным теплоносителем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 37–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-37-40.

Статья поступила в редакцию 15.03.2018 г.  
© А. Г. Михайлов, О. В. Вдовин, Е. Н. Слободина

УДК 620.9  
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43

**Д. Ю. РУДИ**

Омский институт  
водного транспорта (филиал)  
«Сибирского государственного  
университета водного транспорта»,  
г. Омск

## ПРОБЛЕМА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье описаны проблемы качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем. Приведена актуальность данной проблемы. Ее значимость возросла непосредственно совместно с развитием водного транспорта. Объекты технического флота судовых энергосистем особо подвержены влиянию кондуктивных электромагнитных помех. Сравнительный анализ, приведенный в статье по показателям качества электроэнергии различных стандартов, показывает наличие различий требований, что приводит к простоям в работе, нарушению научно-технического процесса, браку продукции. Вопрос решения научно-технической задачи для повышения качества функционирования электроэнергии судовых электроэнергетических систем до сих пор не решен, что вызывает определенные сложности в своевременном обнаружении проблемы.

**Ключевые слова:** проблемы судовых электроэнергетических систем, проблема электромагнитной совместимости, кондуктивная электромагнитная помеха, показатели качества электроэнергии.

В последнее время очень остро усугубились важнейшие проблемы судовых электроэнергетических систем: качество электроэнергии и электромагнитная совместимость объектов технического флота. Количество нарушений, выявленных в российских электрических сетях, в отличие от других стран, почти в 7 раз больше, т.к. выражаются огромной аварийностью. Актуальность обуславливается значительным физическим износом объектов технического флота. Из-за этого изоляция судовых электроэнергетических систем непосредственно снижает помехоустой-

чивость электрооборудования технического флота и систем регулирования и управления [1].

Данная проблема объясняется несколькими причинами:

— тяжёлые энергетические последствия на объектах технического флота от воздействий климатических особенностей РФ;

— сложная электромагнитная обстановка, которая обусловлена нарушениями требований различных показателей качества электроэнергии по ГОСТу 32144-2013 [2].