

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЖАРОТРУБНОМ КОТЛЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОЖИДКОСТИ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В статье предложено решение проблем, связанных с интенсификацией теплопереноса со стороны высокотемпературного органического теплоносителя за счет использования наночастиц. Представлено критериальное уравнение, характеризующее теплообмен в объеме высокотемпературного органического теплоносителя при естественной конвекции для чистой и наножидкости. Рассмотрены основные уравнения для теплового расчета жаротрубного котла. По результатам расчетного эксперимента построены графики зависимости коэффициента теплоотдачи со стороны жидкостного теплоносителя и топки котла, температуры стенки топки котла, коэффициента теплопередачи для газотрубного пучка, площади конвективного газотрубного пучка от объемной доли наночастиц в теплоносителе.

**Ключевые слова:** высокотемпературный теплоноситель, жаротрубный котел, наножидкость, температура стенки, коэффициент теплоотдачи.

**Введение.** Процесс выработки теплоты жаротрубными водогрейными котлами имеет свою специфику и особенности. 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.

Из-за низкой скорости движения воды в котле на теплообменных поверхностях возникает пристенное кипение. В случае недостаточного качества воды это явление сопровождается накипеобразованием и может вызвать пережог поверхностей нагрева.

Широкое применение в энергетике, в процессах нагрева, нашли высокотемпературные теплоносители (минеральные и синтетические масла). Их применение обусловлено рядом преимуществ: нагрев до высоких температур при атмосферном давлении, малая коррозионная активность по отношению к поверхностям нагрева котла, отсутствие местных вскипаний жидкости. Однако, как показывают расчеты, имеются ухудшения процессов теплообмена со стороны высокотемпературных теплоносителей, по сравнению с водой. Это ведет к увеличению габаритов котла при работе на одинаковой теплопроизводительности. Ухудшение теплообмена вызвано, прежде всего, более низким коэффициентом теплопроводности высокотемпературных теплоносителей по сравнению с водой. Появляется необходимость в интенсификации теплообмена

в жаротрубном котле со стороны жидкостного теплоносителя.

Методы интенсификации можно подразделить на пассивные, которые не требуют прямых затрат энергии, и активные, которые требуют затрат энергии извне. Одним из подходящих методов интенсификации теплообмена является пассивный метод — добавление в жидкость твердых частиц вещества с высокой теплопроводностью. Он не подразумевает изменений габаритных характеристик котла, а влечет лишь изменение теплофизических свойств теплоносителя.

Таким образом, добавление твердых частиц в жидкость может увеличить теплопроводность жидкостей. Но добавление твердых частиц сопровождается следующим:

- образованием отложений из-за нестабильности смесей;
- возрастают гидравлические сопротивления;
- возможен абразивный износ поверхностей нагрева котла.

Из-за этих недостатков использование твердых частиц в теплоносителе не нашло широкого практического применения. Недавние улучшения в нанотехнологиях позволили использовать мелкие твердые частицы диаметром менее 10 нм. Полученные таким образом жидкости имеют более высокую теплопроводность и известны как наножидкости [1–3].

**Объект исследования.** Основные элементы жаротрубного котла — это жаровая труба и конвективный газотрубный пучок. Большинство жаро-

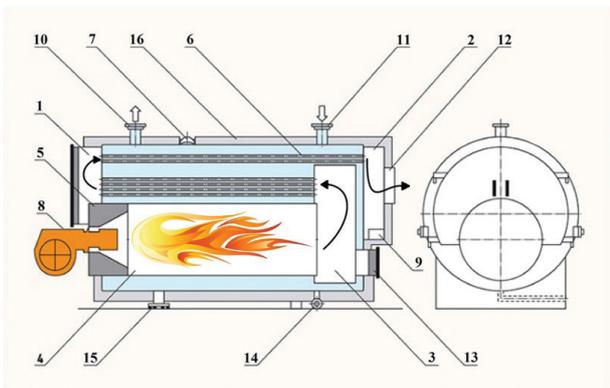


Рис. 1. Схема жаротрубного котла с трехходовым движением продуктов горения: 1 — поворотная камера; 2 — коллекторная камера дымовых газов; 3 — отражатель; 4 — жаровая труба; 5 — горелочная плита с обмуровкой; 6 — дымогарные трубы; 7 — люк-лаз; 8 — горелка; 9 — люк для очистки; 10 — патрубок для выхода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

трубных котлов изготавливаются из теплоизолированного цилиндрического корпуса, который заполняется теплоносителем и в котором располагаются топка (жаровая труба) и конвективный газотрубный пучок. Передача теплоты от факела и продуктов горения к стенкам жаровой трубы осуществляется преимущественно путем излучения. Пройдя жаровую трубу, продукты горения, отдав теплоту теплоносителю, направляются в конвективный пучок труб, где, охладившись до необходимой температуры, удаляются через дымовую трубу. [4, 5]. Схематичная конструкция жаротрубного котла представлена на рис. 1.

**Методика.** Тепловой расчет жаротрубного котла обычно разделяют на две составляющие — это расчет топки и расчет пучка дымогарных труб. Это вызвано тем, что эти части имеют различные геометрические параметры, а теплообмен между продуктами сгорания и стенками котла имеет различный характер — в топке это, преимущественно, излучение, а в пучке дымогарных труб конвекция.

Расчет теплообмена в топке жаротрубного котла основывается на нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов [6].

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

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

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 [7].

Суммарное количество теплоты, переданное в топке:

$$Q_{\text{сум}} = Q_K + Q_A,$$

где  $Q_A$  — количество теплоты, переданное излучением;  $Q_K$  — количество теплоты, переданное конвекцией [7].

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:

$$Q_6 = \varphi \cdot (I' - I'').$$

В этих уравнениях  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t$  — температурный напор, °С;  $B_p$  — расчетный расход топлива, мз/с;  $H$  — расчетная поверхность нагрева, м<sup>2</sup>;  $\varphi$  — коэффициент сохранения теплоты;  $I'$ ,  $I''$  — энтальпии продуктов сгорания на входе в поверхность нагрева и на выходе из нее, кДж/м<sup>3</sup> [7].

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 [6, 7].

В жаротрубных котлах теплота от поверхностей нагрева к теплоносителю передается преимущественно за счет свободной конвекции. Основными величинами, характеризующими этот процесс, являются коэффициенты теплопередачи ( $K$ ) и теплоотдачи ( $\alpha_{ж}$ ) со стороны жидкостного теплоносителя.

Теплообмен при естественной конвекции в большом объеме для высокотемпературных органических теплоносителей описывается критериальным уравнением [2]:

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

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 [2]:

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

Для определения температур поверхностей нагрева жаротрубного котла можно воспользоваться уравнением, выраженным из закона Ньютона — Рихмана:

$$t_{cm} = t_{ж} + \frac{q}{\alpha_{ж}}.$$

где  $t_{ж}$  — температура теплоносителя;  $\alpha_{ж}$  — коэффициент теплоотдачи со стороны жидкого теплоносителя;  $t_{cm}$  — температура стенки поверхности нагрева котла;  $q$  — плотность теплового потока.

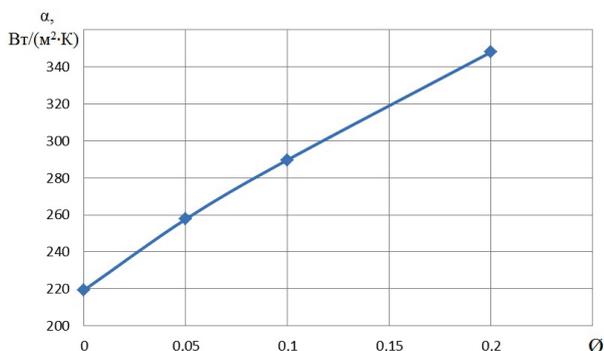


Рис. 2. График зависимости коэффициента теплоотдачи со стороны наножидкости и топки котла от объемной доли наночастиц в теплоносителе

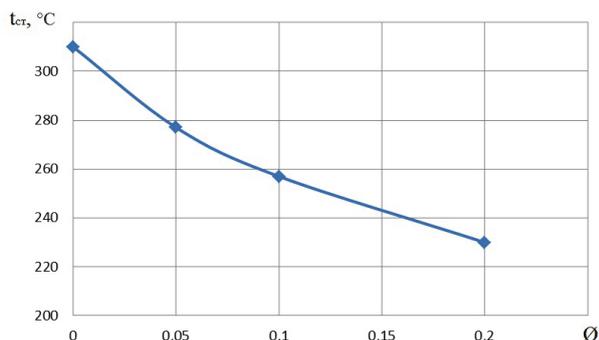


Рис. 3. График зависимости температуры стенки топки котла от объемной доли наночастиц в теплоносителе

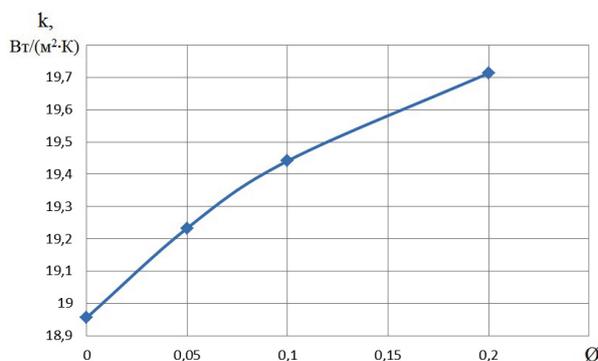


Рис. 4. График зависимости коэффициента теплопередачи для конвективного газотрубного пучка от объемной доли наночастиц в теплоносителе

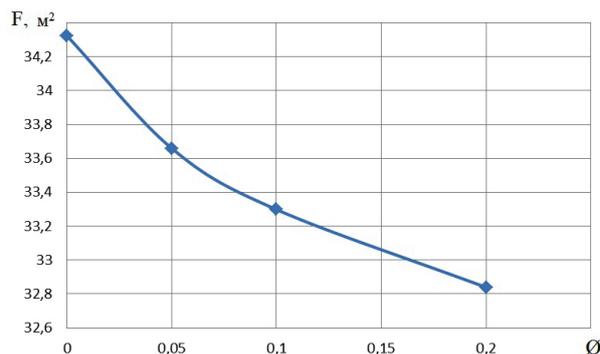


Рис. 5. График зависимости площади теплообменной поверхности конвективного газотрубного пучка от объемной доли наночастиц в теплоносителе

Как видно из представленных выше уравнений, теплофизические и теплообменные характеристики теплоносителя оказывают большое влияние на процессы теплопереноса в жаротрубном котле.

На данный момент существует множество методик нахождения теплофизических свойств наножидкостей, но нет общей модели. Различные модели нахождения основных теплофизических свойств наножидкостей представлены в работах [8–13].

Зарубежными исследователями было проведено множество экспериментальных работ по изучению коэффициента теплопроводности различных наножидкостей. Например, в экспериментальном исследовании [14], где в качестве наножидкости использовалась вода с наночастицами оксида алюминия, наблюдалось улучшение коэффициента теплопередачи от 35 до 45 % при различных значениях числа Рейнольдса. При более низких объемных долях наночастиц в теплоносителе коэффициент теплопередачи был ниже, но наблюдалось повышение теплопроводности наножидкости.

Что касается типа наночастиц, то, согласно работам [14, 15], добавление наночастиц оксидов металлов приводит к повышению коэффициента теплопередачи до 50 %. Наибольшие улучшения коэффициентов конвективного теплообмена (до 150 %) наблюдались в суспензиях углеродных нанотрубок в воде, что объясняется более высоким коэффициентом теплопроводности наножидкостей данного типа.

**Обсуждение результатов.** В качестве теплоносителей в расчетном исследовании приняты дитолилметан и наножидкость на его основе (дитолилметан + Сп) с различной объемной долей наночастиц (от 0 до 0,2). Режим нагрева дитолилметана: тем-

пература на входе в котел — 80 °С, на выходе из котла — 100 °С. Теплопроизводительность котла — 0,5 МВт.

Основные результаты тепловых расчетов жаротрубного котла на высокотемпературном наножидкостном теплоносителе с различной объемной долей наночастиц представлены в виде графиков на рис. 2–5.

Расчеты показывают, что с повышением концентрации наночастиц в жидкости значительно увеличивается коэффициент теплоотдачи со стороны наножидкости (рис. 2). Это вызвано увеличением коэффициента теплопроводности, плотности и числа Нуссельта соответственно. Можно сделать вывод, что эти характеристики оказывают наибольшее влияние на теплообмен и теплопередачу, чем, например, изменение вязкости наножидкости.

Вследствие увеличения коэффициента теплоотдачи наблюдается снижение температуры стенок жаровой трубы и конвективного пучка труб (рис. 3).

За счет увеличения коэффициента теплопередачи в конвективном газотрубном пучке (рис. 4) снижается теплообменная площадь газотрубного пучка (рис. 5).

**Выводы.** Расчетное исследование жаротрубного котла на высокотемпературном наножидкостном теплоносителе показало, что с увеличением объемной доли наночастиц в теплоносителе происходит интенсификация теплообмена со стороны жидкостного теплоносителя, снижается температура стенок поверхностей теплообмена котла, уменьшаются габаритные характеристики котла.

С изменением объемной доли наночастиц в дитолилметане от 0 до 0,2 наблюдается увеличе-

ние коэффициента теплоотдачи от 219 Вт/(м<sup>2</sup>·К) до 348 Вт/(м<sup>2</sup>·К), снижение температуры стенок жаровой трубы со 310 °С до 230 °С и стенок конвективного газотрубного пучка со 125 °С до 112 °С, теплообменная поверхность конвективного газотрубного пучка котла уменьшается до 4 % за счет увеличения коэффициента теплопередачи от 18,95 Вт/(м<sup>2</sup>·К) до 19,7 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Представленные результаты создают предпосылки для создания высокоэффективного жаротрубного котла с улучшенными массогабаритными характеристиками.

#### Библиографический список

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.
2. Четчин А. В. Высокотемпературные теплоносители. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1971. 496 с.
3. Efstathios E. (Stathis) Michaelides. Nanofluidics. Thermodynamic and Transport Properties. Springer International Publishing, 2014. 335 p. ISBN 978-3-319-05620-3.
4. Брюханов О. Н., Кузнецов В. А. Газифицированные котельные агрегаты. М.: Инфра-М, 2005. 390 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; 978-3-540-77714-4.
6. Кузнецов Н. В., Митор В. В., Дубровский И. Е., Карасина Э. С. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1973. 296 с.
7. 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.
8. Pak B. C., Choi Yo. I. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particles // Experimental Heat Transfer. A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion. 1998. Vol. 11, Issue 2. P. 151–170. DOI: 10.1080/08916159808946559.
9. Xuan Yi., Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2000. Vol. 43, Issue 19. P. 3701–3707. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00369-5.
10. Udawattha D. S., Narayana M., Wijayarathne U. P. L. Predicting the effective viscosity of nanofluids based on the rheology of suspensions of solid particles // Journal of King Saud University – Science. 2017. DOI: 10.1016/j.jksus.2017.09.016.
11. Tyagi H., Khullar V. Application of Nanofluids as the Working Fluid in Concentrating Parabolic Solar Collectors //

Proceedings of the 37th National and 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, Dec. 16–18, 2010. India, Chennai, Madras, IT, 2010. P. 16–18.

12. Udawattha D. S., Narayana M. Development of a Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: A Reliable Approach for Nanofluids Containing Spherical Nanoparticles // Journal of Nanofluids. 2018. Vol. 7, Issue 1. P. 129–140.

13. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-73-78.

14. Wen D., Ding Yu. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47, Issue 24. P. 5181–5188. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.012.

15. Ding Yu., Alias H., Wen D., Williams R. A. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids) // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49, Issue 1-2. P. 240–250. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009.

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

SPIN-код: 7337-8036

AuthorID (РИНЦ): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

**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. Интенсификация теплообмена в жаротрубном котле при использовании наножидкости в качестве теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 67–70. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-67-70.

Статья поступила в редакцию 01.11.2018 г.

© А. Г. Михайлов, О. В. Вдовин, Е. Н. Слободина