

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-

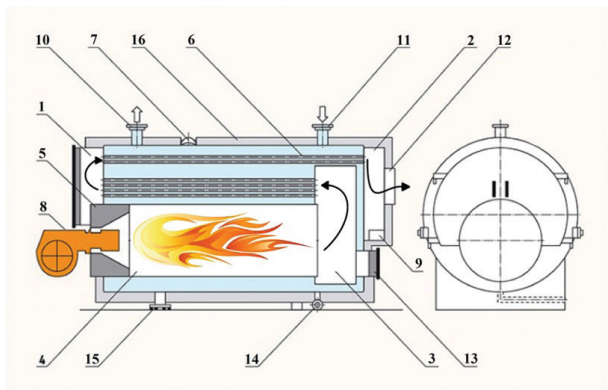


Рис. 1. Схема жаротрубного котла с трехходовым движением продуктов горения: 1 — поворотная камера; 2 — коллекторная камера дымовых газов; 3 — отражатель; 4 — жаровая труба; 5 — горелочная плита с обмуровкой; 6 — дымогарные трубы; 7 — люк-лаз; 8 — горелка; 9 — люк для очистки; 10 — патрубок для выхода 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; α_T — интегральный коэффициент теплового излучения топки; c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ψ_s — коэффициент эффективности эффективности поверхности нагрева; F_{cm} — площадь поверхности стенок, ограничивающих топку; T — средняя температура продуктов сгорания в топке; T_{cm} — средняя температура поверхности нагрева [7].

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 [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/(м²·К); Δt — температурный напор, °С; B_p — расчетный расход топлива, мз/с; H — расчетная поверхность нагрева, м²; φ — коэффициент сохранения теплоты; I' , I'' — энтальпии продуктов сгорания на входе в поверхность нагрева и на выходе из нее, кДж/м³ [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; ψ — 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.

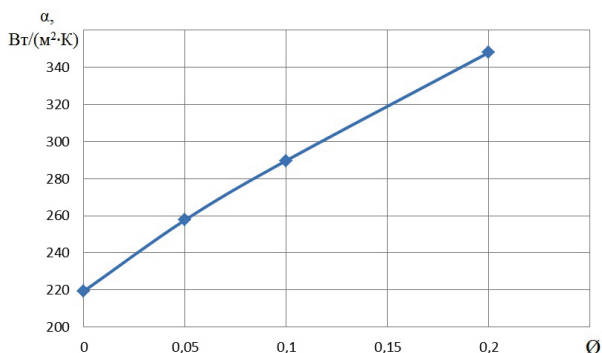


Рис. 2. График зависимости коэффициента теплоотдачи со стороны наножидкости и топки котла от объемной доли наночастиц в теплоносителе

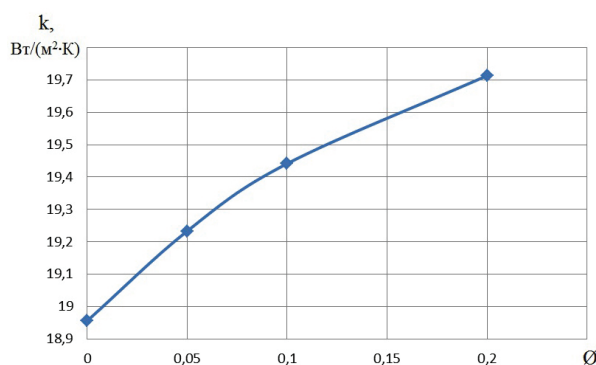


Рис. 4. График зависимости коэффициента теплопередачи для конвективного газотрубного пучка от объемной доли наночастиц в теплоносителе

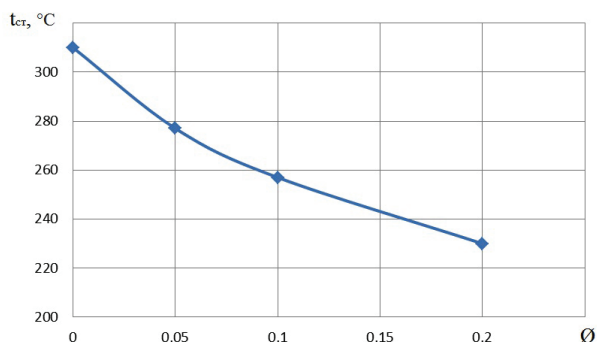


Рис. 3. График зависимости температуры стенки топки котла от объемной доли наночастиц в теплоносителе

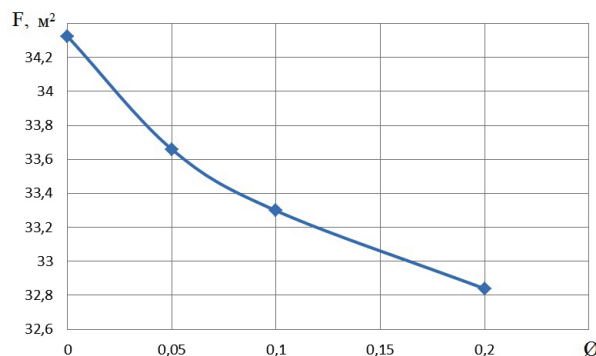


Рис. 5. График зависимости площади теплообменной поверхности конвективного газотрубного пучка от объемной доли наночастиц в теплоносителе

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 + Сц) 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/(м²·К) до 348 Вт/(м²·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/(м²·К) до 19,7 Вт/(м²·К).

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

Библиографический список

- Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.
- Чечеткин А. В. Высокотемпературные теплоносители. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1971. 496 с.
- Efstathios E. (Stathis) Michaelides. Nanofluidics. Thermodynamic and Transport Properties. Springer International Publishing, 2014. 335 p. ISBN 978-3-319-05620-3.
- Брюханов О. Н., Кузнецов В. А. Газифицированные котельные агрегаты. М.: Инфра-М, 2005. 390 с. ISBN 5-16-002442-5.
- Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. Heidelberg: Springer Berlin, 2008. 427 p. ISBN 978-3-540-77715-1; 978-3-540-77714-4.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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