

ТЕПЛООБМЕН В ЭЛЕМЕНТАХ ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В статье предложено решение проблем, связанных с интенсификацией теплопереноса со стороны высокотемпературного органического теплоносителя. Приведены основные преимущества высокотемпературных теплоносителей. Рассмотрены процессы переноса теплоты теплопроводностью и конвекцией. Представлено критериальное уравнение, характеризующее теплообмен в объеме высокотемпературного органического теплоносителя при естественной конвекции. Дано описание наножидкости и ее основные характеристики. Представлены существующие модели расчета основных теплофизических свойств наножидкости (плотность, теплоемкость, вязкость и теплопроводность). По результатам расчетного эксперимента построены графики зависимости плотности, теплоемкости, вязкости, коэффициента теплопроводности, числа Грасгофа и коэффициента теплоотдачи дитолилметана и наножидкостей на его основе (дитолилметан + Cu (1 %) и дитолилметан + Cu (5 %)) от температуры.

Ключевые слова: высокотемпературный теплоноситель, жаротрубный котел, наножидкость, теплопроводность, коэффициент теплоотдачи, неводяной теплоноситель.

Введение. Высокотемпературный нагрев теплоносителя в жаротрубных котлах является актуальным вопросом современной энергетики. Но осуществить данный процесс в современных установках является сложной задачей.

Достичь высокой температуры в теплоносителе можно следующими методами:

- подогревать воду высокого давления;
- нагревать водяной пар до высоких температур;
- использовать высокотемпературные минеральные и синтетические теплоносители.

Одним из перспективных является последний способ. Но при использовании высокотемпературного теплоносителя имеет место увеличение площади теплообменной поверхности котла. Это вызвано менее интенсивным теплообменом со стороны высокотемпературного теплоносителя при изменении его теплофизических свойств. Особое влияние на теплоперенос в жаротрубных котлах имеет коэффициент теплопроводности теплоносителя, который у основных высокотемпературных органических теплоносителей меньше чем у воды.

Теплообмен. В жаротрубных котлах теплота от поверхностей нагрева к теплоносителю передается преимущественно за счет свободной конвекции. Понятие конвективного теплообмена охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Под

конвекцией теплоты понимают перенос теплоты при перемещении макрочастиц жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой, в область с другой температурой. Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Если в единицу времени через единицу контрольной поверхности нормально к ней проходит масса жидкости $\rho \vec{w}$, кг/(м²·с), где \vec{w} — скорость, ρ — плотность жидкости, то вместе с ней переносится плотность теплового потока

$$\vec{q}_{\text{конв}} = \rho \vec{w} h. \quad (1)$$

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. В результате конвективный теплообмен описывают уравнением

$$\vec{q} = \vec{q}_{\text{тепр}} + \vec{q}_{\text{конв}} = -\lambda \nabla T + \rho \vec{w} h. \quad (2)$$

Здесь \vec{q} является локальным (местным) значением плотности теплового потока за счет конвективного теплообмена. Первый член правой части уравнения (2) описывает перенос теплоты теплопроводностью, второй — конвекцией.

Конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью соприкасающе-

гося с ним тела называется конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов. В общем случае α является функцией формы и размеров тела, режима движения, скорости и температуры жидкости, физических параметров жидкости и других величин. По-разному протекает процесс теплоотдачи в зависимости от природы возникновения движения жидкости [1].

Известно, что во всех случаях теплообмена между потоком теплоносителя и обтекаемым телом существенное значение имеют явления, протекающие в гидродинамическом и тепловом пограничных слоях. Соотношение между толщиной гидродинамического слоя δ_r и теплового слоя δ_m в основном зависит от соотношения кинематической вязкости ν и теплопроводности среды a , то есть от критерия Прандтля Pr . По значению величины Pr во всех случаях конвективного теплообмена, протекающего без изменения агрегатного состояния, жидкие высокотемпературные теплоносители можно разделить на две группы: теплоносители у которых $Pr \ll 1$ или $a \gg \nu$ — жидкометаллические теплоносители, и теплоносители у которых $Pr > 1$ или $a < \nu$ ионные и органические теплоносители.

Интенсивность переноса тепла молекулярной теплопроводностью характеризуется величиной $a = \lambda / (c\rho)$, а интенсивность переноса количества движения — величиной ν . Следовательно, у жидкометаллических теплоносителей неравенство $a \gg \nu$ означает, что молекулярный перенос тепла более интенсивен, чем молярный перенос количества движения.

Здесь $\delta_m > \delta_r$, и поэтому влияние молекулярной теплопроводности значительно и в турбулентном ядре потока. Таким образом, у жидкометаллических теплоносителей не только в вязком и промежуточных пограничных слоях, но даже на внешней границе последнего интенсивность турбулентного переноса тепла меньше молекулярной теплопроводности [2].

Естественная или свободная конвекция происходит из-за эффектов, вызванных разностью плотностей слоев в объеме жидкости. Различия в плотности обусловлены разностью температур или неоднородным распределением фаз. Число Грасгофа (Gr) является безразмерной переменной, которая характеризует величину естественной конвекции:

$$Gr = \frac{gL^3\beta(t_c - t_0)}{\nu^2}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения, m/s^2 ; L — определяющий характерный линейный размер поверхности теплообмена, m ; t_c — температура поверхности теплообмена, $^{\circ}C$; t_0 — температура теплоносителя, $^{\circ}C$; ν — коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ; β — температурный коэффициент объёмного расширения теплоносителя, K^{-1} .

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

$$Nu = CGr^m Pr^n, \quad (4)$$

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]:

$$n = 0,3 + \frac{0,02}{Pr_{cp}^{1/3}}. \quad (5)$$

Теплофизические свойства наножидкостей.

Известно, что теплопроводность в твердых телах больше, чем у жидкостей. Жидкости, используемые в качестве теплоносителей, такие как вода, этиленгликоль и моторное масло, имеют низкую теплопроводность по сравнению с теплопроводностью твердых веществ, особенно металлов. Таким образом, добавление твердых частиц в жидкость может увеличить проводимость жидкостей. Недавние улучшения в нанотехнологиях позволили ввести мелкие твердые частицы диаметром менее 10 нм в жидкость. Полученные таким образом жидкости получили название — наножидкости.

Наножидкости представляет собой жидкость, содержащую нанометровые частицы, называемые наночастицы. Наночастицы, используемые в наножидкостях, обычно изготавливаются из металлов, оксидов, карбидов или углеродных нанотрубок. Общие базовые жидкости включают в себя воду, этиленгликоль и масло.

Наножидкости имеют новые свойства, которые делают их полезными во многих аспектах в передаче тепла. Они характеризуются повышенной теплопроводностью и коэффициентом теплоотдачи по сравнению с базовой жидкостью. В табл. 1 представлены значения коэффициента теплопроводности для некоторых материалов, которые обычно используются в качестве базовых жидкостей и наночастиц.

Существует четыре основных теплофизических свойства, связанных с жидкостью: вязкость, теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность.

Рассмотрим существующие модели определения основных теплофизических свойств наножидкости.

Плотность

Модель Pak и Choi [3]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \left(1 + \frac{\varnothing (\rho_p - \rho_{bf})}{\rho_{bf}} \right), \quad (6)$$

где ρ_{nf} — плотность наножидкости; ρ_{bf} — плотность базовой жидкости; ρ_p — плотность вещества частиц; \varnothing — объемная доля частиц.

Удельная теплоемкость

Модель Xuan и Roetzel [4]:

$$(C_p)_{nf} = \frac{(C_p)_{bf} \left(1 - \frac{\varnothing ((C_p)_{bf} \rho_{bf} - (C_p)_p \rho_p)}{(C_p)_{bf} \rho_{bf}} \right)}{\left(1 + \frac{\varnothing (\rho_p - \rho_{bf})}{\rho_p} \right)}, \quad (7)$$

где $(C_p)_{nf}$ — теплоемкость наножидкости; $(C_p)_{bf}$ — теплоемкость базовой жидкости; $(C_p)_p$ — теплоемкость вещества наночастиц.

Таблица 1

Коэффициенты теплопроводности различных материалов

Название материала	λ , Вт/м·К
Углеродные нанотрубки	~ 3000
Cu (медь)	401
Au (золото)	317
Si C (карбид кремния)	120
CuO (окись меди)	40
Глинозем (окись алюминия, Al_2O_3)	20
Вода	0,613
Этиленгликоль	0,253
Масло машинное	0,145
Дитолилметан	0,125

Вязкость

В настоящее время существуют различные теоретические соотношения для моделирования вязкости наножидкости. Рассмотрим модели определения вязкости, представленные в работе [5].

Модель Эйнштейна

Эйнштейн получил теоретическую формулу для оценки значений вязкости композитов или смесей в 1906 году. Эта модель развивалась при допущении линейной вязкой жидкости, включая суспензии твердых и сферических частиц. Модель Эйнштейна справедлива для очень низкой объемной доли Φ :

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2,5\Phi). \quad (8)$$

Модель Brinkman

Brinkman модифицировал модель Эйнштейна, для нахождения вязкости со средней объемной долей частиц до 4 %:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(\frac{1}{(1 - \Phi)^{2,5}} \right). \quad (9)$$

Модель Batchelor

Batchelor реформировал теоретическую модель Эйнштейна, учитывая эффект броуновского движения:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2,5\Phi + 6,5\Phi^2). \quad (10)$$

Модель Graham

Graham предложил обобщение модели Batchelor. Его формула хорошо согласуется с моделью Эйнштейна для объемной доли частиц ниже 0,02. Модель Graham выглядит следующим образом:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(1 + 2,5\Phi + 4,5 \left[\frac{1}{\left(\frac{h_s}{d_p} \right) \left[2 + \left(\frac{h_s}{d_p} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{h_s}{d_p} \right) \right]^2} \right] \right). \quad (11)$$

Модель Wang

Wang предложил модель для нахождения вязкости жидкости с частицами как:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 7,3\Phi + 123\Phi^2). \quad (12)$$

Модель Avsec и Oblak

Avsec и Oblak скорректировали модель Wang следующим образом:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(1 + 2,5\Phi_e + (2,5\Phi_e)^2 + \dots \right), \quad (13)$$

$$\Phi_e = \Phi \left(1 + \frac{h}{r} \right)^3, \quad (14)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(\frac{1}{1 - 2,5\Phi_e} \right). \quad (15)$$

Модель Masoumi

Masoumi предложил новое соотношение, учитывая броуновское движение наночастицы в наножидкости:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(1 + \frac{\rho_p \cdot V_B \cdot d_p^2}{72 \cdot \delta \cdot C} \right), \quad (16)$$

$$V_B = \sqrt{\frac{18 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot N_A \cdot \rho_p \cdot d_p^2}}, \quad (17)$$

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot d_p^2}{6 \cdot \Phi}}, \quad (18)$$

$$C = \left\{ (-1,133 \cdot d_p - 2,771)\Phi + (0,09 \cdot d_p - 0,393) \right\} \cdot 10^{-6}. \quad (19)$$

В уравнениях (8–19) μ_{nf} — вязкость наножидкости; μ_{bf} — вязкость базовой жидкости; Φ — объемная доля частиц; h_s — расстояние между частицами; d_p — диаметр частицы; Φ_e — эффективная объемная доля; h — толщина нанослоя; r — радиус наночастицы; ρ_p — плотность частиц; V_B — броуновское движение; δ — расстояние между наночастицами; C — поправочный коэффициент; T — температура; N_A — постоянная Авогадро.

Теплопроводность

Модель Максвелла [6]:

$$k_{nf} = k_{bf} \left(\frac{k_p + (n-1)k_{bf} + (n-1)\Phi(k_p - k_{bf})}{k_p + (n-1)k_{bf} - \Phi(k_p - k_{bf})} \right). \quad (20)$$

Модель Pak и Choi [7]:

$$k_{nf} = k_{bf}(1 + 7,47\Phi). \quad (21)$$

Модель Udawattha и Narayana [8]:

$$k_{nf} = k_{bf} \left(1 + \frac{n\Phi_e(k_p - k_{bf})}{k_p + (n-1)k_{bf} - \Phi_e(k_p - k_{bf})} \right) + \frac{5\rho_{bf} \left(\Phi^{0,0009T+0,25} \right) C_{pbf} k_p d_p V_B \sqrt{\frac{\pi}{18}}}{\mu_{bf}}. \quad (22)$$

Результаты расчета жаротрубного котла с различными теплоносителями

Наименование	Обозн.	Разм.	Теплоноситель	
			Вода	Дитолилметан
1	2	3	4	5
Топка котла				
Коэффициент теплопроводности теплоносителя	λ	Вт/(м·К)	0,678	0,108
Коэффициент кинематической вязкости теплоносителя	ν	м ² /с	0,34·10 ⁻⁶	0,47·10 ⁻⁶
Критерий Грасгофа	Gr	—	4,44·10 ¹¹	19,1·10 ¹¹
Критерий Нуссельта (критериальное уравнение)	Nu	—	479,71	1343,6
Коэффициент теплоотдачи со стороны жидкостного теплоносителя	α	Вт/(м ² ·К)	516,26	230,34
Конвективный газотрубный пучок				
Критерий Грасгофа	Gr	—	3,99·10 ⁷	7,14·10 ⁷
Критериальное уравнение	Nu	—	51,057	82,81
Коэффициент теплоотдачи со стороны жидкостного теплоносителя	α_2	Вт/(м ² ·К)	916,2	235,36
Коэффициент теплопередачи в газотрубном пучке	K_w	Вт/(м ² ·К)	29,41	27,175
Расчетная поверхность нагрева газотрубного пучка	F_n	м ²	21,51	26,14

$$V_B = \sqrt{\frac{18 \cdot K_B \cdot T}{\pi \cdot \rho_p \cdot d_p^3}} \quad (23)$$

$$\Phi_e = \Phi \left(1 + \frac{h}{r}\right)^3 \quad (24)$$

В уравнениях (20–24) k_{nf} — коэффициент теплопроводности наножидкости; k_{bf} — коэффициент теплопроводности базовой жидкости; k_p — коэффициент теплопроводности частиц; Φ — объемная доля частиц; n — коэффициент формы ($n=3$ — для сфер, $n=6$ — для цилиндров); d_p — диаметр частицы; Φ_e — эффективная объемная доля; ρ_p — плотность базовой жидкости; ρ_p — плотность частиц; μ_{bf} — вязкость базовой жидкости; T — температура; V_B — Броуновское движение; h — толщина нанослоя; r — радиус наночастицы; K_B — постоянная Больцмана.

Расчетный эксперимент. В качестве теплоносителей в расчетном исследовании приняты вода и дитолилметан. Режим нагрева воды: температура воды на входе в котел — 70 °С, на выходе из котла — 95 °С. Режим нагрева дитолилметана: высокотемпературный (температура на входе в котел — 80 °С, на выходе из котла — 220 °С).

Основные результаты тепловых расчетов жаротрубного котла на различных теплоносителях представлены в табл. 2.

Расчеты показывают, что число Нуссельта у дитолилметана выше, чем у воды в 2,8 раза для топки котла и в 1,6 раза для конвективного газотрубного пучка. Однако вода имеет более высокий коэффи-

циент теплопроводности, в 6 раз больше, чем у дитолилметана. Вследствие этого коэффициент теплоотдачи у воды более высокий.

Вопрос увеличения коэффициента теплопроводности решается внесением в высокотемпературный теплоноситель нанометровых частиц вещества, имеющего большую теплопроводность.

В экспериментальной работе [9] было установлено, что добавление небольшой доли углеродных нанотрубок в моторное масло увеличивает теплопроводность базовой жидкости в 2–2,6 раза. Первоначально это усовершенствование было охарактеризовано как «аномальное» и вызвало огромный интерес к тепловым характеристикам всех наножидкостей в первом десятилетии двадцать первого века. Среди базовых жидкостей, которые были исследованы для состава наножидкостей, были вода, моторные масла и этиленгликоль. А в качестве наночастиц использовали оксиды алюминия (Al_2O_3), оксиды меди (как CuO , так и Cu_2O), однослойные и многослойные углеродные нанотрубки, медь (Cu) и золото (Au).

Большинство исследователей наблюдали повышение теплопроводности жидкостей, это улучшение обычно находилось в диапазоне 5–50 % и не приближалось к высоким уровням исследования [9]. Только в одном исследовании [10] указывалось об улучшениях близких к 100 % в суспензии частиц Ag_2Al в воде и жидкостях на основе этиленгликоля. Обзор [11], относящийся к частицам Al_2O_3 в воде и этиленгликоле, показал, что типичные улучшения теплопроводности находятся в диапазоне 4–30 %, даже когда объемная доля твердых веществ относительно высока (около 6 %) [6].

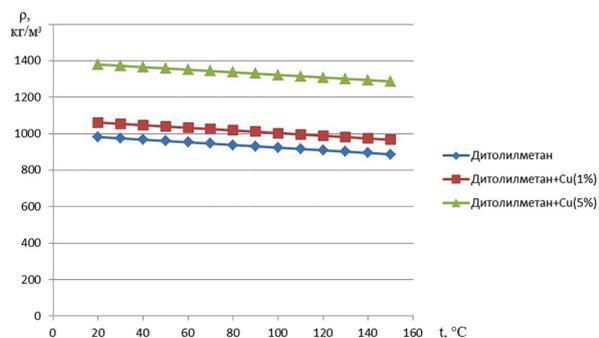


Рис. 1. График зависимости плотности дитолиметана и наножидкостей на его основе от температуры

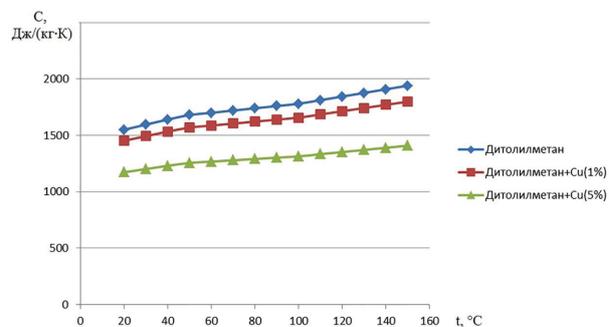


Рис. 2. График зависимости теплоемкости дитолиметана и наножидкостей на его основе от температуры

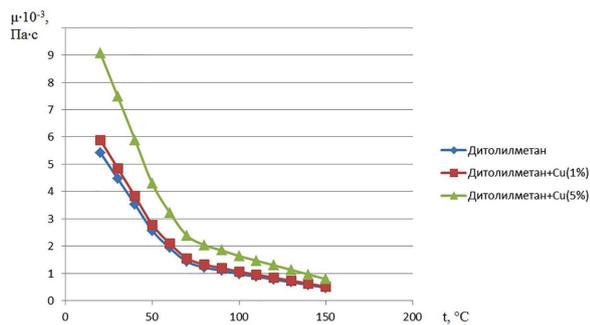


Рис. 3. График зависимости вязкости дитолиметана и наножидкостей на его основе от температуры

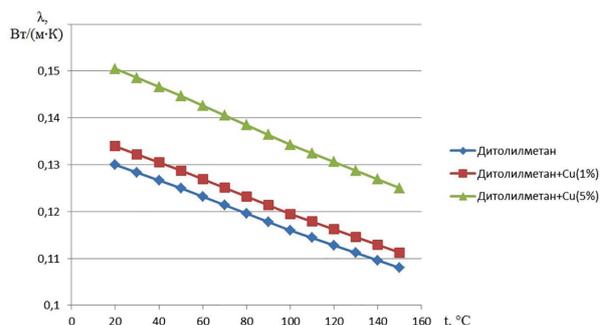


Рис. 4. График зависимости коэффициента теплопроводности дитолиметана и наножидкостей на его основе от температуры

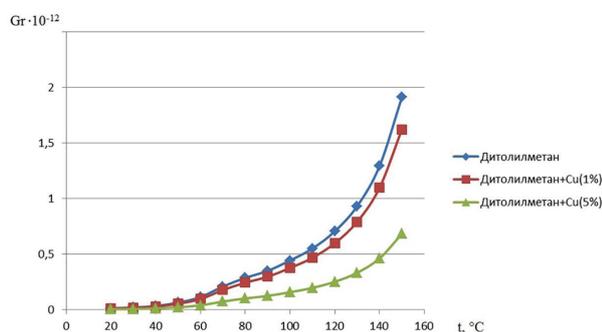


Рис. 5. График зависимости числа Грасгофа для дитолиметана и наножидкостей на его основе от температуры

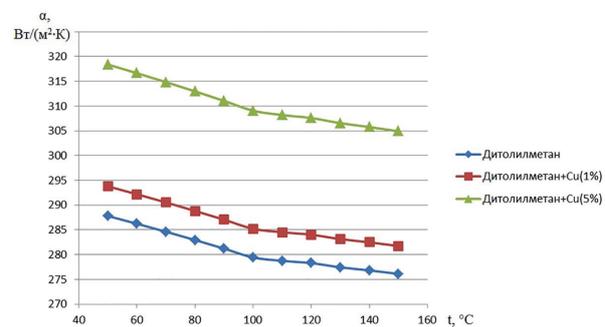


Рис. 6. График зависимости коэффициента теплоотдачи дитолиметана и наножидкостей на его основе от температуры

Для расчетного исследования теплофизических свойств и теплообмена наножидкости в зависимости от ее средней температуры в качестве базовой жидкости выбран высокотемпературный органический теплоноситель — дитолиметан, а в качестве наночастиц — медь. Объемная доля частиц 0,1 % и 0,5 %. Графики результатов расчетных экспериментов представлены на рис. 1–6. С изменением концентрации наночастиц в жидкости от 0 % до 5 % наблюдается изменение теплофизических характеристик в зависимости от температуры. При этом α уменьшается с ростом температуры, т.к. изменение коэффициента теплопроводности является определяющим. Но с увеличением концентрации наночастиц α увеличивается в пределах 10 % по сравнению с базовой жидкостью.

Выводы. Расчеты показывают, что добавление наночастиц меди в дитолиметан изменяет тепло-

физические свойства дитолиметана следующим образом: плотность увеличивается; теплоемкость уменьшается; вязкость увеличивается; коэффициент теплопроводности увеличивается.

При объемной доле наночастиц меди 0,01 наблюдается увеличение коэффициента теплопроводности до 3 %, а при $\varnothing=0,05$ увеличение коэффициента теплопроводности на 15 %. За счет увеличения теплопроводности, увеличивается коэффициент теплоотдачи.

Представленные результаты создают предпосылки для создания высокоэффективного жаротрубного котла.

Библиографический список

- Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 483 с.

2. Четкин А. В. Высокотемпературные теплоносители. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1971. 496 с.
3. Pak B. C., Choi Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion. 1998. Vol. 11, Issue 2. P. 151–170. DOI: 10.1080/08916159808946559.
4. Xuan Y., 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.
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. September 2017. DOI: 10.1016/j.jksus.2017.09.016.
6. Efstathios E. (Stathis) Michaelides. Nanofluidics. Thermodynamic and transport properties. Springer International Publishing, 2014. 335 p. ISBN 978-3-319-05620-3.
7. Khullar V., Tyagi H. Application of nanofluids as the working fluid in concentrating parabolic solar collectors // Proceedings of the 37th National & 4th International Conference on Fluid Mechanics & Fluid Power, Dec. 16–18, 2010. IIT Madras, Chennai, India. 2010. P. 16–18.
8. 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.
9. Choi S. U. S., Zhang Z. G., Yu W. [et al.]. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79, Issue 14. P. 2252–2254. DOI: 10.1063/1.1408272.
10. Chopkar M., Sudarshan S., Das P. K. [et al.]. Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid // Metallurgical and Materials Transactions A. 2008. Vol. 39A. P. 1535–1542. DOI: 10.1007/s11661-007-9444-7.
11. Khanafer K., Vafai K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54, Issues 19–20. P. 4410–4428. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048.

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. 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.

Статья поступила в редакцию 18.06.2018 г.

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