

ИМ СО РАН в области математики и информатики : материалы IX Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. «Прикладная математика и фундаментальная информатика», посвящ. 80-летию со дня рождения акад. РАН Евтушенко Ю. Г. (Омск, 23-30 апр. 2019 г.). Омск: ОмГТУ, 2019. Т. 3, № 1. С. 236–237.

2. Любчинова В. В., Соседко В. В., Янишевская А. Г., Крысова И. В. Алгоритмы и программное обеспечение для автоматизации проектирования радиоприемного устройства // Автоматизация в промышленности. М.: ИнфоАвтоматизация, 2021. № 3. С. 46–48.

3. Комолов Д. А. [и др.]. Системы автоматизированного проектирования фирмы Altera MAX+plus II и Quartus II. Краткое описание и самоучитель. М.: РадиоСофт, 2002. 352 с.

УДК 621.6.03

## ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ В ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛАХ

### ISSUES OF USING HIGH-TEMPERATURE HEAT-TRANSFER FLUID WITH IMPROVED THERMOPHYSICAL PROPERTIES IN FIRE-TUBE BOILERS

Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

E. N. Slobodina, A. G. Mikhailov

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В работе представлены особенности использования высокотемпературных теплоносителей с наночастицами в котлах, классификация методов получения наножидкостей, описание основных теплофизические свойства и коэффициенты теплопроводности материалов, используемых для получения наножидкостей. Рассмотрены механизмы теплопереноса в наножидкостях, определяющих эффективность работы котла. Полученные данные являются предпосылками для создания эффективного жаротрубного котла с высокотемпературным теплоносителем.

**Ключевые слова:** жаротрубный котел, наночастицы, высокотемпературный теплоноситель, вязкость, теплоотдача.

DOI: 10.25206/2310-4597-2021-1-38-41

#### I. ВВЕДЕНИЕ

В качестве источника теплоты в малой энергетике нашли широкое применение жаротрубные котлы, в том числе работающие на высокотемпературном теплоносителе. Данные котлоагрегаты независимо от мощности, обладают не сложной конструкцией, не вызывают трудностей при первичном монтаже и в дальнейшем обслуживании, не требуют существенных капитальных затрат при эксплуатации, способствуют высокой степени автоматизации технологического процесса.

В качестве теплоносителя в жаротрубных котлах возможно использование высокотемпературных жидкостей на основе органических и синтетических масел. Их применение обусловлено рядом преимуществ: нагрев до высоких температур при атмосферном давлении, малая коррозионная активность, отсутствие местных вскипаний. Применение неводяного теплоносителя требует детального исследования особенностей теплообмена протекающих в котлоагрегате.

#### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**Цель исследования:** получение основных расчетных зависимостей, характеризующих теплоперенос в наножидкостях при конвекции вынужденной и свободной, а также при кипении – процессах, определяющих эффективность работы жаротрубного котла.

**Постановка задачи.** Процессы теплообмена в жаротрубных котлах со стороны теплоносителя определяются влиянием ряда теплофизических характеристик рабочего тела: коэффициентом теплопроводности,

плотностью, вязкостью. Необходимо рассмотреть критериальные зависимости для расчета теплообмена при свободной, вынужденной конвекции и кипении при движении наножидкостей в теплогенераторах.

### III. ТЕОРИЯ

Изменение свойств теплоносителя влияет на особенности протекания процессов теплообмена в рабочем пространстве жаротрубного котла, и оказывают непосредственное влияние на эффективность работы котла [1].

В последние годы возник интерес к теплоносителям, содержащим нанометровые частицы твердых веществ с высокой теплопроводностью.

В связи с этим необходимо создание высокоэффективного котла малой мощности с высокотемпературным теплоносителем.

Главное техническое требование при разработке газотрубных котлов обеспечение высокой теплопередающей поверхности при оптимальных геометрических характеристиках [2].

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. 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 [1].

Замена теплоносителя влияет на процессы тепломассопереноса, протекающие в жаротрубном котле.

ТАБЛИЦА 1  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

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 таблице 1 представлены значения коэффициента теплопроводности для некоторых материалов, которые обычно используются в качестве базовых для смеси жидкостей и наночастиц.

В настоящее время известны различные методы изготовления наножидкости. Их можно квалифицировать на одноступенчатые и двухступенчатые. В одноступенчатом методе наножидкость получается за один технологический цикл, в котором сначала металл (материал наночастиц) испаряется электронным пучком в вакуумной камере, затем оседает на вращающийся диск, который предварительно покрывается базовой жидкостью (маслом).

Методы двухступенчатого получения наножидкостей основаны на смешении готовых продуктов – рабочей жидкости и продуктов нанотехнологий.

В механизме теплопереноса в наножидкостях при вынужденной конвекции различают два уровня: макроскопический и микроскопический.

Рассматривая макроскопический уровень, формулу для расчета коэффициента теплоотдачи можно представить в следующем виде:

$$h = k_f / \delta_t, \quad (1)$$

где  $\delta_f$  и  $k_f$  – локальная толщина теплового пограничного слоя и эффективная теплопроводность жидкости у стенки [3].

В общем случае при вынужденном движении теплоносителя в котле критериальное уравнение теплоотдачи запишется:

$$Nu = f/8(Re - 1000)Pr / \left(1 + \delta^+ (f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)\right), \quad (2)$$

где  $f$  – безразмерный коэффициент трения;  $Re$  – число Рейнольдса;  $\delta^+$  – эмпирический параметр.

Определяющим фактором при теплообмене являются характер изменения плотности и характер изменения вязкости. В общем случае при свободной конвекции в теплоносителе критериальное уравнение теплоотдачи запишется:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670Ra^{0.25}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}, \quad (3)$$

где  $Ra$  – число Рэлея,  $Pr$  – число Прандтля [4].

Теплоотдача при кипении высокотемпературного теплоносителя с добавлением наночастиц:

$$h = \mu_f h_{fg} (T_w - T_{sat})^2 \left[ \frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\sigma} \right]^{1/2} \left( \frac{c_f}{K_{sur} h_{fg} Pr_f^n} \right)^3, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения кипящей жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $c_f$  – теплоемкость жидкости;  $\mu_f$  – динамическая вязкость жидкости;  $h_{fg}$  – коэффициент теплоотдачи на границе раздела фаз;  $K_{sur}$  – коэффициент шероховатости;  $T_w$  – температура стенки;  $T_{sat}$  – температура насыщения [4].

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Наибольшая теплоотдача наблюдается на начальном участке трубы. Это связано с тем, что на входном участке происходит уменьшение теплового пограничного слоя в независимости от используемой жидкости.

При добавлении наночастиц в базовую жидкость рост коэффициента теплоотдачи будет наблюдаться, если произойдет увеличение ее теплопроводности.

Анализируя формулу (1), можно отметить следующую взаимосвязь: коэффициент теплоотдачи будет уменьшаться, если рост локальной толщины теплового пограничного слоя будет превышать рост теплопроводности жидкости у стенки. Если изменения этих двух параметров одинаковы, то коэффициент теплоотдачи останется неизменным, в случае, если рост теплопроводности жидкости у стенки больше, чем рост толщины теплового пограничного слоя, то в таком случае коэффициент теплоотдачи увеличивается. Предложенный механизм качественно объясняют экспериментальные данные.

#### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тепломассоперенос в наножидкости при свободной конвекции значительно отличается от тепломассопереноса в чистой жидкости из-за неравномерного распределения температур и концентраций.

Учитывая опыт проведенных ранее исследований, использование наножидкостей в качестве теплоносителя может приводить как к интенсификации теплообмена, так и к его ухудшению [3].

Коэффициент теплоотдачи значительно снижается при малых концентрациях до 0,4 %, при этом уровень теплообмена снижается на 10 – 30 %. Определяющим фактором для коэффициента теплоотдачи является концентрация частиц.

При использовании более высоких концентраций более 0,4 % наблюдается интенсификация теплообмена на 20 – 30 % [3].

В случае кипения высокотемпературного теплоносителя наблюдается повышение критического теплового потока. Рост критического теплового потока составляет 3 – 4,5 раза.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование наночастиц в высокотемпературных теплоносителях в настоящее время является перспективным, так как приводит к интенсификации процесса теплообмена.

Использование наночастиц может существенно повышать теплопроводность базовой жидкости, и данный метод интенсификации теплоотдачи за счет использования стабильных наножидкостей в качестве высокотемпературных теплоносителей для жаротрубных котлов перспективен.

При естественной конвекции теплоносителя в жаротрубных котлах необходимо определить рациональное соотношение между изменениями плотности и вязкости при добавлении наночастиц для повышения теплообмена.

При кипении наножидкостей характерно повышение уровня теплообмена и увеличение критического теплового потока.

Приведенные данные являются предпосылками для создания эффективного жаротрубного котла с высокотемпературным теплоносителем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Процессы теплообмена в объеме жаротрубного котла с неводяным теплоносителем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 37–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-37-40.
2. Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. Heidelberg: Springer Berlin, 2008. 427p. ISBN 978-3-540-77715-1; 978-3-540-77714-4.
3. Терехов В. И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188.
4. Efstathios E. (Stathis) Michaelides. Nanofluidics. Thermodynamic and Transport Properties. Springer International Publishing, 2014. 335 p. ISBN 978-3-319-05620-3.

УДК 331:103

## РЕИНЖИНИРИНГ ПРОЦЕССОВ. КЛАССИФИКАЦИИ И ВИДЫ

### PROCESS REENGINEERING. CLASSIFICATIONS AND VIEWS

И. В. Улитина, Е. Т. Гегечкори

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

I. V. Ulitina, E. T. Gegechkori

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В статье рассматриваются теоретические аспекты реинжиниринга бизнес-процессов как способа достижения улучшений в деятельности организаций. Особое внимание уделано существующим классификациям реинжиниринга бизнес-процессов. Целью исследования является рассмотрение понятийно-категориального аппарата реинжиниринга и обобщение точек зрения современных исследователей на реинжиниринг и его виды. Сформулированы основания для выделения видов реинжиниринга, а также кратко описаны их особенности.

**Ключевые слова:** реинжиниринг, классификация, бизнес-процесс.

DOI: 10.25206/2310-4597-2021-1-41-44