

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## THERMODYNAMIC ANALYSIS

Статья поступила в редакцию 09.02.15. Ред. рег. № 2180

The article has entered in publishing office 09.02.15. Ed. reg. No. 2180

УДК 532.546

## ТЕПЛООБМЕН ТЕЛ, ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЕННЫХ В ПСЕВДООЖИЖЕННЫЙ СЛОЙ, И ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИЯ

*В.Н. Королев<sup>1</sup>, В.Ю. Красных<sup>1</sup>, А.В. Островская<sup>1</sup>, С.А. Нагорнов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Россия 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

тел.: (343) 375-47-37, e-mail: aostrov9@gmail.com

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве  
Россия 392022, Тамбов, пер. Ново-Рубежный, 28

doi: 10.15518/isjaee.2015.04.006

Заключение совета рецензентов: 16.02.15 Заключение совета экспертов: 20.02.15 Принято к публикации: 27.02.15

Экспериментально исследован процесс интенсификации теплоотдачи тел, частично погруженных в псевдоожигенный слой или плавающих на его поверхности, за счет направленных на выступающую поверхность тела гетерогенных струй (смесь твердых частиц с воздухом). Гетерогенные струи генерировались непосредственно псевдоожигенным слоем с помощью размещенных в нем трубок и направлялись на поверхность теплообмена. Показано, что применение гетерогенных струй, генерируемых самой псевдоожигенной средой, приводит к увеличению среднего по поверхности тела коэффициента теплоотдачи, не изменяя энергетические затраты на процесс псевдоожигения. Уменьшение различия в интенсивности процесса теплоотдачи для частей тела, которые контактируют с разными средами, позволяет улучшить качество термообрабатываемых изделий.

Ключевые слова: псевдоожигенный слой, гетерогенная струя, теплоотдача.

## HEAT TRANSFER OF BODIES PARTIALLY SUBMERGED IN THE FLUIDIZED BED AND ITS INTENSIFICATION

*V.N. Korolev<sup>1</sup>, V.Yu. Krasnykh<sup>1</sup>, A.V. Ostrovskaya<sup>1</sup>, S.A. Nagornov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

19 Mira St., Yekaterinburg, 620002 Russian Federation

ph.: (343) 375-47-37, e-mail: aostrov9@gmail.com

<sup>2</sup>All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture.  
28 Novo-Rubezhny Al., Tambov, 392022 Russian Federation

Referred 16 February 2015 Received in revised form 20 February 2015 Accepted 27 February 2015

The paper deals with the experimental study of the heat transfer bodies enhancement partially submerged in the fluidized bed or floating on its surface by directing heterogeneous jets on the exposed surface of the body (mixture of solid particles with air). Heterogeneous jets were generated directly by the fluidized bed by tubes which placed in the bed and directed to the heat transfer surface. The study shows that the use of heterogeneous jets generated by the fluidizing medium itself, leads to extension of the average surface body area on heat transfer coefficient without alter-

ing the energy required on the fluidization process. Reducing the difference in the intensity of the heat transfer process for the body parts which contact with different environments, improves the quality of heat-treatable products.

Keywords: fluidized bed, heterogeneous jet, heat transfer.



Королев Владимир  
Николаевич  
Vladimir N. Korolev

**Сведения об авторе:** д. т. н., профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

**Образование:** Уральский политехнический институт (1967 г.)

**Область научных интересов:** гидродинамика и тепломассообмен в псевдооживленных средах.

**Публикации:** 170, в том числе 4 монографии, 9 авторских свидетельств.

**Information about the author:** D.Sc. (Engineering), Professor of the «Heat Engineering» department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Education:** Ural Polytechnic Institute (1967).

**Research interests:** hydrodynamics and heat and mass transfer in fluidized medium.

**Publication:** 170 including 4 monographs, 9 invention certificates.



Красных Владислав  
Юрьевич  
Vladislav Yu. Krasnykh

**Сведения об авторе:** к. т. н., доцент кафедры «Оборудование и эксплуатация газопроводов» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

**Образование:** ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ» (2004 г.).

**Область научных интересов:** гидродинамика и тепломассообмен в псевдооживленных средах.

**Публикации:** 30, в том числе 1 авторское свидетельство.

**Information about the author:** PhD (Engineering), Associate Professor of the «Equipment and Operation of Gas Pipelines» department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Education:** Ural State Technical University (1967).

**Research interests:** hydrodynamics and heat and mass transfer in fluidized medium.

**Publishing:** 30 including 1 invention certificate.



Островская Анна  
Валентиновна  
Anna V. Ostrovskaya

**Сведения об авторе:** к. т. н., доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Лауреат премии Правительства РФ в области образования.

**Образование:** Уральский политехнический институт (1989 г.).

**Область научных интересов:** гидродинамика и тепломассообмен в псевдооживленных средах, энергетическая эффективность.

**Публикации:** 39, в том числе 1 монография.

**Information about the author:** PhD (Engineering), Associate Professor of the «Heat Engineering» department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; winner of the Russian government in the field of education.

**Education:** Ural Polytechnic Institute (1989)

**Research interests:** hydrodynamics and heat and mass transfer in fluidized medium, energy efficiency.

**Publishing:** 39 including 1 monograph.



Нагорнов Станислав  
Александрович  
Stanislav N. Nagornov

**Сведения об авторе:** д. т. н., профессор, зам. директора института по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве».

**Образование:** Тамбовский институт химического машиностроения (1972 г.).

**Область научных интересов:** гидродинамика и тепломассообмен в псевдооживленных средах, традиционные и альтернативные источники энергии.

**Публикации:** более 200, включая 16 монографий, 26 авторских свидетельств.

**Information about the author:** D.Sc. (Engineering), Deputy Director of the «All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture» Institute.

**Education:** Tambov Institute of Chemical Engineering (1972).

**Research interests:** hydrodynamics and heat and mass transfer in fluidized medium, traditional and alternative energy.

**Publishing:** more than 200 including 16 monographs, 26 invention certificates.

## Введение

Часть изделий, подвергающихся термообработке, а также элементы теплообменных аппаратов, размещенных в псевдооживленном слое, могут выступать из него или плавать на его поверхности (например, при вулканизации длинномерных изделий). Верхняя часть поверхности, выступающая из слоя, находится в контакте с воздухом или с сильно разбавленной дисперсной фазой, а нижняя часть изделия погружена в псевдооживленный слой. Значительное различие в интенсивности теплообмена с воздухом и слоем отрицательно сказывается на качестве термообработки изделия.

Установлено [1], что интенсивность теплоотдачи между наружной поверхностью изделия и частицами дисперсного теплоносителя в первую очередь определяется частотой смены частиц, находящихся у этой стенки, частицами из основного объема слоя, а способ генерации движения частиц – вибрацией [2], псевдооживлением или под действием гравитации [1] – с точки зрения теплопереноса, играет второстепенную роль. Так же как и в однофазном потоке, интенсивность процессов переноса теплоты зависит от интенсивности турбулентных пульсаций скорости потока у теплообменной поверхности, а способ их генерации не имеет значения [3].

Экспериментальное исследование [2] частоты пульсаций отдельных частиц вблизи вертикальной пластины, погруженной в псевдооживленный слой, показало, что с увеличением скорости фильтрации и уменьшением диаметра частиц увеличивалось их пульсационное движение, частота соударений со стенкой возрастала. Статистическая обработка интервалов времени между соударениями продемонстрировала, что максимум вероятности данного интервала приходился на промежуток времени  $(5-10) \cdot 10^{-3}$  с, которому соответствовали частоты 100–200 Гц. Для процессов теплообмена наиболее важны такие движения частиц, которые направлены перпендикулярно поверхности.

Следовательно, для улучшения теплообмена частей тела, выступающих из слоя, необходимо на их поверхность направлять поток частиц, и чем больше будет его скорость и концентрация частиц в нем, тем интенсивность теплоотдачи будет выше.

Экспериментально установлено [4], что если полый цилиндр (трубку) опустить в псевдооживленный слой, то высота, на которую поднимается дисперсная среда внутри трубки, превосходит высоту слоя в аппарате и зависит от числа псевдооживления  $W$  ( $W = w_{\phi} / w_0$ , где  $w_{\phi}$  – скорость фильтрации,  $w_0$  – скорость, при которой начинается псевдооживление). При переходе плотного слоя в псевдооживленное состояние ( $W \geq 1,05$ ) из-за пониженного сопротивления внутренней полости трубки оживающий агент с большой скоростью устремляется внутрь ее, и в результате эжекции происходит интенсивный подсос

твердых частиц из пространства, примыкающего к нижнему торцу трубки. Дисперсная среда без дополнительной затраты энергии с большой скоростью движется вверх по каналу. Если длина канала меньше высоты подъема дисперсной среды, то происходит интенсивное фонтанирование частиц. Поэтому, снабдив верхний торец канала изогнутыми соплами (рис. 1), можно не только осуществлять транспорт твердых частиц по трубке, но и направлять гетерогенную струю (поток частиц и воздуха) в любое место, в данном случае на поверхность теплообменника, находящегося в псевдооживленном слое.

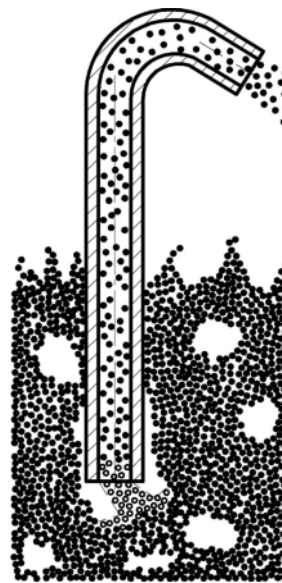
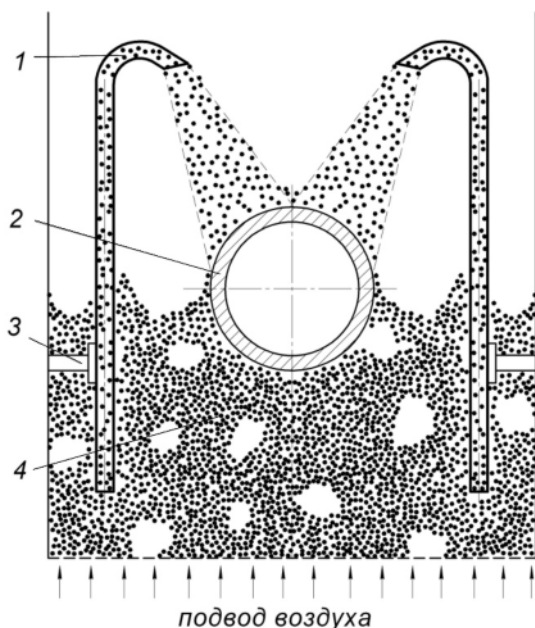


Рис. 1. Гетерогенная струя  
Fig. 1. Heterogeneous jet

## Методика эксперимента

Псевдооживленный слой создавался в аппарате квадратного сечения 150x150 мм, высотой 300 мм. В качестве материала дисперсной среды использовались частицы корунда, размером  $d_a = 0,51$  и  $0,13$  мм, псевдооживляемые воздухом. В опытах использовалась провальная решетка с оптимальным (с точки зрения эффективности процесса внешнего теплообмена) живым сечением 9,82 % и относительным (по отношению к сопротивлению слоя) от 0,1 до 0,2 гидравлическим сопротивлением [5]. В качестве тел, частично погружаемых в псевдооживленный слой или плавающих на его поверхности, использовались полые алюминиевые цилиндры диаметром  $D$  от 25 до 55 мм и длиной  $L$  от 50 до 140 мм с смонтированным в них нагревателем и четырьмя термопарами. Средний по поверхности коэффициент теплоотдачи определялся по стационарной методике. Для формирования гетерогенных струй в аппарате устанавливались трубки с внутренним диаметром  $d_{тр}$  от 4 до 9 мм, нижние части которых были погружены в псевдооживленный слой. Трубки могли перемещаться по высоте слоя и устанавливались так, чтобы загнутые

их концы были направлены на поверхности теплообмена. Схема установки показана на рис. 2.

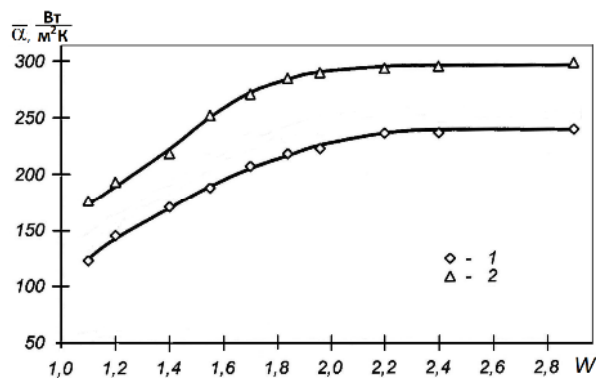


**Рис. 2.** Схема установки: 1 – сопла; 2 – цилиндр; 3 – устройство изменения глубины погружения сопла в слой; 4 – аппарат с псевдоожиженным слоем

**Fig. 2.** Plant layout: 1 – nozzles; 2 – cylinder, 3 – the nozzle immersion depth changing device; 4 – a fluidized bed apparatus

### Результаты исследования и их обсуждение

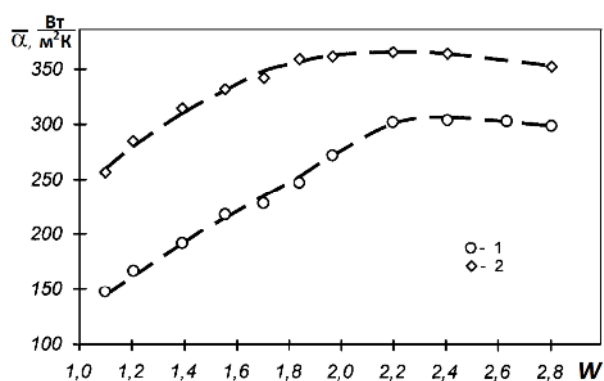
Результаты экспериментов по исследованию влияния гетерогенных струй на интенсивность внешнего теплообмена тел, частично погруженных в псевдоожиженный слой, представлены на рис. 3, а тел, плавающих на поверхности слоя при различных режимах псевдоожижения – на рис. 4.



**Рис. 3.** Влияние гетерогенных струй на величину коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  для цилиндра, на 35 % вертикально погруженного в слой при различных режимах псевдоожижения  $W$ . Материал частиц: корунд,  $d_p = 0,51$  мм. Цилиндр:  $D = 30$  мм,  $L = 90$  мм. 1 – без обработки гетерогенными струями; 2 – обработка 3-мя струями,  $d_{тр} = 6$  мм

**Fig. 3.** The effect of heterogeneous jets on the heat transfer coefficient  $\alpha$  for a cylinder on 35% vertically immersed in a bed under different fluidization modes  $W$ . Particulate material: corundum,  $d_p = 0.51$  mm. Cylinder:  $D = 30$  mm,  $L = 90$  mm. 1 - no processing by heterogeneous jets; 2 - processing with 3 jets,  $d_{tr} = 6$  mm

Анализ результатов, представленных на рисунках 3 и 4, прежде всего свидетельствует о том, что обработка гетерогенными струями поверхности, которая не находится в слое, дает положительный результат. Величина среднего по поверхности тела коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  увеличивается (примерно на 50 %). Для плавающего на поверхности слоя тела максимум коэффициента теплоотдачи имеет место при меньшем числе псевдоожижения. Следовательно, максимальная интенсивность теплоотдачи имеет место при меньших затратах энергии на процесс псевдоожижения. Здесь уместно заметить, что транспорт гетерогенной среды (смеси твердых частиц с воздухом) по трубкам осуществляется без дополнительной затраты энергии.



**Рис. 4.** Влияние гетерогенных струй на величину коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  для цилиндра плавающего на поверхности слоя при различных режимах псевдоожижения  $W$ . Материал частиц: корунд,  $d_p = 0,51$  мм. Цилиндр:  $D = 30$  мм,  $L = 90$  мм. 1 – без обработки гетерогенными струями; 2 – обработка 3-мя струями,  $d_{тр} = 6$  мм

**Fig. 4.** The influence of heterogeneous jets on the heat transfer coefficient  $\alpha$  for a cylinder floating on the surface of the bed under different fluidization modes  $W$ . Particulate material – corundum  $d_p = 0.51$  mm. Cylinder:  $D = 30$  mm,  $L = 90$  mm. 1 - no processing by heterogeneous jets; 2 - processing with 3 jets,  $d_{tr} = 6$  mm

На интенсивность процесса теплоотдачи влияет и количество гетерогенных струй, направляемых на поверхность теплообмена. Выполненные нами исследования показали, что при увеличении количества струй с 3-х до 9-ти величина среднего коэффициента теплоотдачи при оптимальном режиме псевдоожижения ( $W = 2$ ) возрастает примерно на 60 %.

### Заключение

Проведенные исследования показали пути решения задачи, связанной с неравномерностью процесса теплообмена для частей тела, находящегося в контакте с воздухом и псевдоожиженным слоем. Использование гетерогенных струй, генерируемых самой псевдоожижаемой средой, приводит к увеличению среднего по поверхности тела коэффициента теплоотдачи, не изменяя энергетические затраты на процесс псевдоожижения. Уменьшение различия в интенсивности процесса теплоотдачи для частей те-



ла, которые контактируют с разными средами, позволяет улучшить качество термообработываемых изделий.

### Список литературы

1. Бувевич Ю.А., Королёв В.Н., Сыромятников Н.И. Обтекание тел и внешний теплообмен в псевдоожигенных средах. Свердловск: Изд-во УрГУ, 1991.
2. Горбунова А.М., Сапожников Б.Г. Внешний локальный массообмен в виброкипящем слое инертного материала // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2013. № 7. С. 10–14.
3. Щеклеин С.Е. Трёхфакторная модель теплопереноса в жидкостных пленках // Теплофикация ядерных энергетических установок. Межвузовский сборник научных трудов. Свердловск. 1989. С. 16–26.
4. Красных В.Ю., Королёв В.Н., Островская А.В., Нагорнов С.А. Пневмотранспорт дисперсной среды по вертикальной трубке, опущенной в псевдоожигенный слой // Теплоэнергетика. 2013. № 11. С. 17–20.
5. Красных В.Ю., Королёв В.Н. Оптимизация энергетических затрат на образование псевдоожигенного слоя при сохранении высокой интенсивно-

сти внешнего теплообмена // Промышленная энергетика. 2006. № 12. С. 30–33.

### References

1. Buevich Yu.A., Korolev V.N., Syromyatnikov N.I. Obtekanie tel i vnesnij teploobmen v psevdoozhigennykh sredah. Sverdlovsk: UrGU Publ., 1991.
2. Gorbunova A.M., Sapozhnikov B.G. Vnesnij lokal'nyj massoobmen v vibrokipashem sloe inertnogo materiala. *International Scientific Journal "Alternativnaâ energetika i êkologiâ" (ISJAEE)*, 2013, no. 7, pp. 10–14.
3. Sheklein S.E. Trehfaktornaâ model' teploperenosa v zhidkostnykh plenках. *Tep-lofikaciâ âdernykh ênergetičeskikh ustanovok. Mezhvuzovskij sbornik naučnykh trudov*, Sverdlovsk, 1989, pp. 16–26.
4. Krasnyh V.Yu., Korolev V.N., Ostrovskaya A.V., Nagornov S.A. Pnevмотransport dispersnoj sredy po vertikal'noj trubke, opušennoj v psevdoozhigennyj sloj. *Teploênergetika*, 2013, no. 11, pp. 17–20.
5. Krasnyh V.Yu., Korolev V.N. Optimizaciâ ênergetičeskikh zatrat na obrazovanie psevdoozhigennogo sloâ pri sohranenii vysokoj intensivnosti vnešnego teploobmena. *Promyšlennââ ênergetika*, 2006, no. 12, pp. 30–33.

Транслитерация по ISO 9:1995

### В СГАУ прошла IX Международная научно-техническая конференция «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей»

Конференцию организует кафедра теплотехники и тепловых двигателей. Конференция, прошедшая в сентябре 2014 года, вышла на международный уровень. В Самаре в течение двух дней специалисты Рыбинска (РГАТУ и НПО «Сатурн»), Казани, Москвы (Курчатовского института, Центрального института авиационного моторостроения, ГосНИИ химмотологии Минобороны России) и Самары обсуждали результаты научно-исследовательских работ по процессам горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. На конференцию прибыл также представитель Алматинского института горения профессор Нужнов Ю.В. (Казахстан).

На пленарном заседании прозвучал доклад профессора кафедры теплотехники СГАУ Ланского А.М. по методам и средствам повышения эффективности рабочего процесса камер сгорания малоразмерных ГТД. Анатолий Михайлович обобщил деятельность центра газодинамических исследований СГАУ за последние два десятилетия. Знаковым стал доклад *Пиралишвили Ш.А. (РГАТУ), обобщивший работу по вихревому эффекту, которую Шота Александрович начал будучи сотрудником КуАИ. Важным стал доклад сотрудника ЦИАМ Третьякова В.В. о проблемах и перспективах математического моделирования элементов рабочего процесса в камерах сгорания ГТД: сейчас многие предприятия занимаются моделированием процессов, проходящих в камерах сгорания, в виртуальной среде.*

Об итогах работы учёных СГАУ и ОАО «Гидравлика» (Уфа) по доводке пусковых характеристик камеры сгорания испарительного типа вспомогательного двигателя рассказал А. Ю. Чечулин, главный конструктор уфимского предприятия. Представитель предприятия ОАО «Кузнецов» Лавров В.Н. рассказал об итогах совместной работы – исследовании малоэмиссионной камеры сгорания по устойчивости процесса горения. Этот доклад – обобщение опыта работы коллектива кафедры СГАУ и предприятия по созданию высокотехнологических производств в рамках 218 Постановления Правительства РФ.

Нужнов Юрий Васильевич рассказал о результатах работы Алматинского института проблем горения. По итогам работы конференции он предложил подать в комитет по образованию и науки Казахстана совместную заявку на получение гранта по фундаментальным исследованиям в области турбулентного горения.

Оргкомитет конференции отметил высокий уровень докладов студентов и аспирантов Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. Могилева Ксения Александровна, Баринев Сергей Николаевич, Соколова Анна Александровна, Соколова Ольга Александровна награждены дипломами за лучшие доклады в области изучения вихревого эффекта (научный руководитель Пиралишвили Шота Александрович).

Доклады аспирантов СГАУ Зубрилина Ивана Александровича, Матвеева Сергея Сергеевича и Соколова Алексея Борисовича отличались чёткой постановкой цели работы, квалифицированным подходом к исследованию по своему направлению, высоким уровнем исполнения поставленных задач.

Также дипломами за лучший доклад награждены студенты и магистранты СГАУ: Красовская Юлия Вячеславовна, Зубрилин Роман Александрович.

Среди стендовых докладов оргкомитет отметил работы студентов Климантова Даниила Александровича и Семенихина Александра Сергеевича.

secfdr.ssau.ru

