



## Оценка параметров теплообмена в аппарате с псевдоожижаемой насадкой для эффективного использования теплового потенциала газов систем аспирации стройиндустрии

С.А. Кошкарев<sup>1</sup>, П.А. Роцин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

<sup>2</sup> - ООО «Газпром энерго» Надымский филиал, Волгоград

**Аннотация:** Статья посвящена вопросу совершенствования теплообменных аппаратов для использования вторичного теплового потенциала газоздушных потоков аспирационных систем в стройиндустрии. Модернизация технологий и устройств, обеспечивающих более эффективное использование тепловых, энергетических ресурсов и является важной задачей, решение которой отвечает требованию инновационного преобразования промышленности и стройиндустрии. Использование тепла отходящих газов от оборудования термической обработки сырья и продукции позволяет экономить количество сжигаемого топлива в целом в теплоэнергетическом цикле предприятий. В статье представлены результаты исследования по оценке параметров теплообмена в аппарате предложенной конструкции с насадкой в виде псевдоожиженного слоя гранулированного материала. Получены и представлены данные для расчета теплообмена в теплообменнике - утилизаторе с псевдоожижаемой насадкой в виде гранул-зерен ряда материалов по регрессионным соотношениям.

**Ключевые слова:** гранула, теплообменник, псевдоожижение, слой, стройматериал, скорость, загрязнение, атмосфера, система, аспирация утилизация, тепло, сбережение.

Повышение эффективного использования тепловых и энергетических ресурсов, включая вторичные, весьма актуально в настоящее время и способствуют инновационному развитию экономики страны. Модернизация промышленности, строительного комплекса, и дальнейшее совершенствование теплосберегающих технологий и устройств, в т.ч. теплообменных аппаратов, позволяющих эффективно использовать потенциал вторичных источников тепла и ресурсов, является задачей государственной важности (Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями)).

---



Одним из практически востребованных направлений с использованием возобновляемых и не возобновляемых теплоэнергетических ресурсов является их применение для систем горячего водоснабжения [1]. По результатам работы [1] модернизированная система теплоснабжения весьма эффективно использовала энергию централизованной теплосети с реализацией смешанной схемы систем воздушного отопления и горячего водоснабжения здания без дополнительной линии рециркуляции.

В [2] рассматривается математическая модель процессов теплообмена в солнечном воздушном коллекторе, – теплообменных устройствах установки нагрева воды. Авторами [2] исследована возможность использования тепла солнечной водонагревательной установки для отопления теплиц. Результаты исследований [2, 3] показывают актуальность практического использования низкопотенциальной тепловой энергии для целей отопления и горячего водоснабжения.

При этом одним из наиболее перспективных направлений может считаться интенсификация теплообмена в псевдооживленных слоях. Результаты изучения теплообмена между ограждающими стенками котла с циркулирующим псевдооживленным слоем гранулированного материала в печи представлены в работе [4]. Авторами было установлено, что порозность псевдооживленного слоя наиболее существенно влияет на интенсивность процесса теплообмена.

В [5] изучался процесс в теплообменнике с псевдооживленным слоем при вымораживании соли из раствора. Проведенная оценка параметров работы исследованного теплообменника показало целесообразность и рентабельность его использования в диапазоне исследуемых параметров при стабильных условиях работы в сравнении с обычным поверхностным теплообменным устройством. В [6] также отмечено, что частицы псевдооживленного слоя способны удалять отложения со стенок и

---



предотвратить загрязнение теплообменников. Предложенная конструкция позволяет упростить масштабирование данных устройств.

Расположение поверхностей теплообмена в псевдооживленном слое твердого гранул, зерен материала в значительной степени позволяют использовать остаточную энергию тепла отходящих газов систем аспирации теплогенерирующего оборудования, составляющего около 25% от суммарного количества тепла [7-9], что придает актуальность таким исследованиям.

Проведенный обзор некоторой незначительной части источников технической литературы показал на актуальность дальнейших как фундаментальных, так и прикладных технических исследований и моделирования в области процессов и аппаратов теплообмена в псевдооживленных слоях. Появление новых конструкций таких устройств [10] требует их дальнейшего изучения и развития модельных представлений, описывающих происходящие в них процессы.

Наиболее эффективным техническим мероприятием по сокращению снижению потерь теплоты, выбрасываемой газовоздушными потоками систем аспирации, представляется установка высокоэффективных теплообменников с псевдооживленным слоем гранул. Схема экспериментального стенда для исследования такого типа теплообменного устройства приведена на рис.1.

Значительная сложность теоретических исследований процесса теплообмена, невозможность решения систем уравнения конвективного теплопереноса в трехмерных газовых потоках в т.ч. и с твердой фазой (частицами), что характерно для аппаратов псевдооживленного слоя. Это предполагает использование иных подходов, например, использования критериев подобия и уравнений, описывающих процесс конвективного

теплопереноса в теплоутилизирующих устройствах с псевдоожижаемой насадкой в виде слоя гранул, зерен строительных материалов.

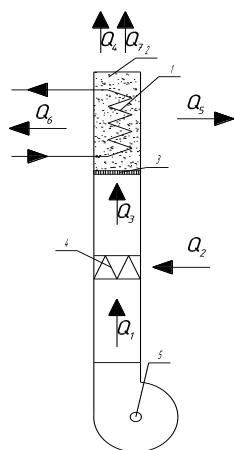


Рис.1. – Схема экспериментальной установки с теплообменником с псевдоожижаемой насадкой в виде слоя гранул – зерен материала.

1 – змеевик; 2 – псевдоожижаемая насадка слоя гранул – зерен материала; 3 – газораспределительная решетка; 4 – нагревательный элемент; 5 – тягодутьевое устройство.

Уравнение теплового баланса для установки имеет вид

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7, \quad (1)$$

где  $Q_1$  - количество теплоты, образовавшейся в результате сжатия воздуха в вентиляторе, Вт;

$Q_2$  - количество теплоты, получаемое от электронагревателя - калорифера, Вт;

$Q_3$  - количество теплоты, подаваемое в теплообменное устройство, Вт;

$Q_4$  – количество теплота с уходящими газами, Вт;

$Q_5$  - количество теплоты, теряемой через ограждающие конструкции, Вт;

$Q_6$  - полезно используемая теплота, воспринятая водой в змеевике, Вт;



$Q_7$  - количество теплоты, теряемой с улетающими частицами, уносимыми из слоя агентом-газом, Вт.

Эффективность работы теплообменника с псевдооживленным слоем (КПД) на основе схемы рис.1 и уравнения баланса (1) составит

$$\eta = (Q_6 / Q_3) \cdot 100, \% \quad (2)$$

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи от газа  $\alpha_g$  к твердой поверхности змеевика значительно меньше, чем коэффициент теплоотдачи от частиц псевдооживленного слоя  $\alpha_{пс}$ .

Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{пс}$  как функции значению критерия Рейнольдса представлена на рис.2. Изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{пс}$  в зависимости от величины числа Прандтля для среднеинтегрального значения температуры газа в слое  $T_{г,ср}$  представлено на рис.3.

Критерий Рейнольдса  $Re_{эг}$  для твердых частиц-гранул среднемедианным эквивалентным размером гранулы-частицы  $d_{экв,50}$  и среднерасходовой скорости ее движения газового потока  $v_g$ , м/с имеет вид

$$Re_{эг} = (v_g d_{экв,50} / \nu_g) \quad (3)$$

где  $\nu_g$  - кинематическая вязкость газа для среднеинтегрального значения температуры газа в слое, м<sup>2</sup>/с.

Критерий Прандтля  $Pr$  имеет вид

$$Pr = (\nu_g / D_g) \quad (4)$$

Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{пс}$  определяется с использованием значений критерия Рейнольдса и числа Прандтля по известным регрессионным соотношениям, например, [11].

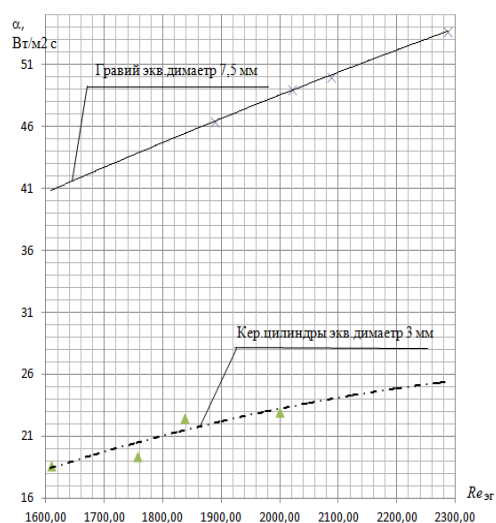


Рис. 2. – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  как функции критерия Рейнольдса,  $Re_{эГ} = (v_{г} d_{эГ} / \nu_{г})$  для гравия и керамических цилиндров

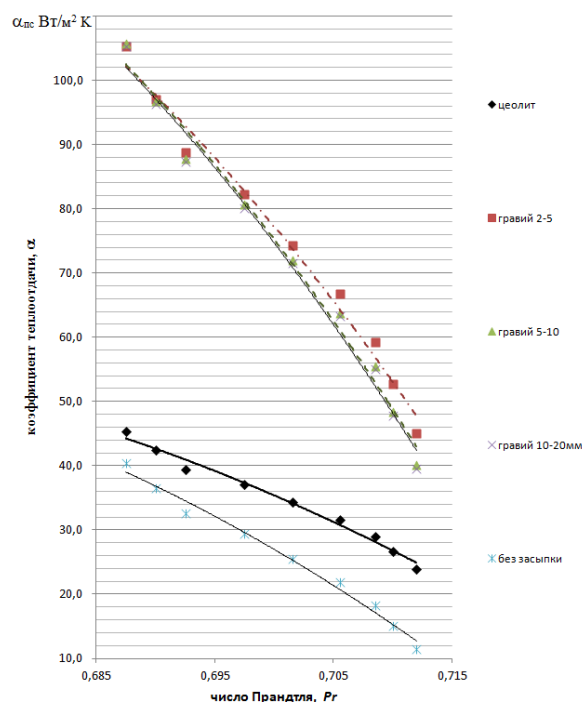


Рис. 3. – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{пс}$  в зависимости от величины числа Прандтля газа  $Pr$  в псевдооживленном слое

### Выводы.

Результатом выполненных и представленных в работе исследований являются экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи частиц псевдооживленного слоя  $\alpha_{пс}$  к поверхности теплообменного элемента от критерия Рейнольдса и числа Прандтля для предложенной конструкции теплообменника.

### Литература

1. Петренко, В.Н., Мокрова, Н.В. Разработка системы горячего водоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии//



Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1617.

1. Смирнов, Р.В., Бахвалов, Ю.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в энергосберегающих гелиоустановках коллектора // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.

2. Романова, М.И., Шерстюков, В.В. Энергоэффективный метод использования излишек тепла солнечного коллектора // Инженерный вестник Дона, 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1440.

3. Basu P., Nag P. K. Heat transfer to walls of a circulating fluidized-bed furnace // Chemical Engineering Science. 1996. V. 51. №. 1. Pp.1-26

4. Habib B., Farid M. Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid–solid fluidized bed heat exchanger // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2006. V. 45. №. 8. Pp.698-710.

5. Pronk P., Ferreira C. A. I., Witkamp G. J. Prevention of fouling and scaling in stationary and circulating liquid–solid fluidized bed heat exchangers: Particle impact measurements and analysis // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. №. 15. Pp.3857-3868.

6. Роцин, П.А. и др. Обоснование использования спирального теплообменника кипящего слоя в тепловых и теплогенерирующих установках // Вестник ВолгГасу. 2011. Вып.25 (№44). С. 208-211.

7. Роцин, П.А. и др. Энергоэффективность тепловых установок со спиральным теплообменником кипящего типа // Вестник ВолгГАСУ. 2013. № 30 (49). С. 212-216.

8. Кошкарев, С.А., Роцин, П.А. Совершенствование эффективных устройств использования теплоэнергоресурсов // Экономика. Бизнес. Банки. 2016. № 1 (14). С. 123-132.

---



9. Патент № 109838. Россия / Роцин, П.А., и др. Спиральный теплообменник кипящего слоя. Заявка № 2011124254 от 15.06.2011. Опубликовано 27.10.2011, Бюл. № 30.

10. Кэйс, В.М. Конвективный тепло- и массообмен / В.М. Кейс. М.: Энергия, 1972. 448 с.

### References

1. Smirnov, R.V., Bahvalov, Ju.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.

2. Romanova, M.I., Sherstjukov, V.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1440.

3. Basu P., Nag P. K. Chemical Engineering Science. 1996. V. 51. №. 1. Pp.1-26.

4. Habib B., Farid M. Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid–solid fluidized bed heat exchanger. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2006. V. 45. №. 8. Pp.698-710.

5. Pronk P., Ferreira C. A. I., Witkamp G. J. Prevention of fouling and scaling in stationary and circulating liquid–solid fluidized bed heat exchangers: Particle impact measurements and analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. №. 15. Pp.3857-3868.

6. Roshchin, P.A, et al. Vestnik VolgGASU. Izdatelstvo VolgGASU. 2011. V.25 (№44). Pp. 208-211.

7. Roshchin, P.A. et al. Vestnik VolgGASU. Volgograd. 2013. V.30 (№49). Pp. 212-216.

8. Koshkarev, S.A., Roshhin, P.A. Jekonomika. Biznes. Banki. 2016. № 1 (14). Pp. 123-132.





9. Patent № 109838. Russia. Roschin P.A. et al. Spiral'nyj teploobmennik kipjashhego sloja [Spiral heat exchanger of the fluidized bed]. Application No. 2011124254 from 15.06.2011. Published On 27.10.2011, Bulletin № 30.

10. Кјејс, V.M. Конвективныј тепло- и массообмен [Convective heat and mass transfer]. М.: Јенергѝја, 1972. 448 p.