



К моделированию теплообменника с псевдоожигаемой насадкой для систем аспирации стройиндустрии

С.А. Кошкарев¹, П.А. Роцин²

¹ - Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

² - ООО «Газпром энерго» Надымский филиал, Волгоград

Аннотация: Статья посвящена вопросу моделированию теплообменников с псевдоожигаемой насадкой дисперсного материала при их использовании в аспирационных системах предприятий стройиндустрии. Инновационное преобразование промышленности и стройиндустрии связано с наиболее полным и эффективным использованием тепловых, энергетических, в том числе низкопотенциальных вторичных ресурсов. Использование тепла отходящих газов от оборудования при термической обработке сырья и продукции, и поступающих в системы аспирации, позволяет сократить удельный расход сжигаемого топлива в расчете на единицу выпускаемой продукции предприятиями стройиндустрии. В статье представлен подход к моделированию и расчету теплообмена в аппарате предложенной конструкции с насадкой в виде псевдоожигенного слоя гранул дисперсного материала. Представлен обобщенный вид регрессионного соотношения для расчета теплообмена в теплообменнике - утилизаторе с псевдоожигаемой насадкой в виде гранул дисперсного для ряда материалов.

Ключевые слова: моделирование, теплообменник, псевдоожигение, слой, материал, скорость, критерий, загрязнение, атмосфера, система, аспирация.

Модернизация предприятий строительного комплекса на основе совершенствования теплосберегающих технологий, разработки теплообменных аппаратов, эффективно использующих потенциал теплоносителей, определяется государством как актуальная стратегическая задача развития страны (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). Рост объемов производства и строительства, стоимости всех видов энергоносителей и ресурсов, делает экономически целесообразным разработку и внедрение теплообменных аппаратов, эффективно использующих в т.ч., вторичный тепловой потенциал.

Одним практически востребованных направлений с использованием возобновляемых и не возобновляемых теплоэнергетических ресурсов



является их применение. В целом ряде работ [1-3] изучался теплообмен в устройствах для систем горячего водоснабжения и отопления. По результатам работы [1] модернизированная система теплоснабжения весьма эффективно использовала энергию централизованной теплосети с реализацией смешанной схемы систем воздушного отопления и горячего водоснабжения здания. В [2] предложена модель описания процесса нагрева воды в теплообменниках, использующих низкопотенциальное теплообмена в солнечном воздушном коллекторе.

Результаты исследований [2, 3] показывают, что имеется экономически обоснованная возможность использования низкопотенциальной энергии солнца для нагрева воды в теплообменных устройствах для целей отопления и горячего водоснабжения теплиц и других зданий и сооружений.

Получение высоких теплотехнических параметров теплообмена в достигается различными техническими решениями. При этом применению псевдооживленного слоя – насадки гранулированного материала в теплообменниках для достижения высоких значений коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи посвящен целый ряд работ, например [4-6]. Результаты исследования изучения теплообмена в печи с псевдооживленным слоем показали, что порозность псевдооживленного слоя, определяемая скоростью теплоносителя агента-газа, оказывает наиболее значительное влияние на величину коэффициента теплопередачи. Размер гранул материала слоя влияет на процесс теплопередачи незначительно [4]. Результаты работы [5] показывают, что предложенная конструкция теплообменника с псевдооживленным слоем для аппарата вымораживания соли из раствора имела более высокие теплотехнические показатели, в сравнении с обычно применяем устройством поверхностного типа, что обеспечило приемлемую рентабельность и его надежную работу. В [6] было установлено, что в исследованной конструкции теплообменника частицы



материала гранул псевдооживленного слоя препятствуют адгезии частиц пыли на стенках устройства, масштабирование которого не является сложной проблемой.

Фундаментальные исследования области процессов и аппаратов теплообмена в псевдооживленных слоях, например, [7], прикладные научно-технические исследования [4-6, 8-10] показывают, что данная тема находится в фокусе внимания ученых. Проведенный обзор даже части источников технической литературы показал на актуальность дальнейшего изучения данного направления в науке и технике. Описание теплообменных процессов в псевдооживленном слое дисперсных материалов на основе моделирования остается также актуальной в настоящее время. При этом использование теплового потенциала отходящих газов от выбросов систем аспирации [10, 11] требует дальнейшего изучения для появляющихся новых конструкций теплообменников с псевдооживленным слоем [12, 13].

Систему уравнений Навье-Стокса в трехмерных координатах, - конвективного теплопереноса газовых потоков, характерных для аппаратов псевдооживленного слоя, даже для случая идеального газа-агента получить не представляется возможным. Одним из методов описаний конвективного теплопереноса в устройствах в т.ч. теплообменников с псевдооживляемой насадкой, возможно на основе теории моделирования с использованием критериев подобия, например [14, 15].

В первом приближении в практических целях для расчета коэффициент теплоотдачи от газа к стенкам змеевика теплообменника $\alpha_{\text{пс}}$ возможно на основе известных регрессионных соотношений критериального вида [16-17]. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{пс}}$ является функцией кинетических и тепловых параметров потенциала газа- агента (скорости, или критерия Рейнольдса, $Re_{\text{эг}}$, среднеинтегрального значения температуры в



слое $T_{г.ср}$, критерия Прандтля $Pr_{г}$). Данные регрессионные зависимости имеют вид [16-18]

$$Nu_{пс} = A_i + B_i (Re_{эг})^m (Pr_{г})^n \quad (1)$$

Здесь $Nu_{пс}$ – критерий Нуссельта $Nu_{пс} = (\alpha_{пс} d_{экр_{50}} / \lambda_{пс})$, вычисленный по среднемедианному значению эквивалентного размера (диаметра) твердых частиц-гранул, $d_{экр_{50}}$, определяемого по данным анализа фракционного состава гранул материала (дисперсионного анализа), м;

$\lambda_{пс}$ – коэффициент теплопроводности псевдооживленного слоя;

$D_{г}$ – коэффициент молекулярного диффузионного перемешивания в газовой фазе, принимаемый по справочным данным, m^2 / c ;

$Re_{эг}$ – критерий Рейнольдса, $Re_{эг} = (v_{г} d_{экр_{50}} / \nu_{г})$ для твердых частиц-гранул среднемедианным эквивалентным размером гранулы-частицы $d_{экр_{50}}$ и относительной среднерасходовой скорости ее движения газового потока $v_{г}$, (м /с);

$Pr_{г}$ – критерий Прандтля $Pr_{г} = (\nu_{г} / D_{г})$.

где $\nu_{г}$ – кинематическая вязкость газа, m^2 / c .

Значения коэффициентов $\nu_{г}$ и $D_{г}$, или собственно величины числа Прандтля $Pr_{г}$, например для случая газа– воздуха для принимаются по справочным данным для среднеинтегрального значения температуры газа в слое $T_{г.ср}$, К, и коэффициента теплопроводности в псевдооживленном слое $\lambda_{пс}$ определяемой расчетом с использованием экспериментальных данных.

При этом определение величины коэффициента эффективной теплопроводности в псевдооживленном слое $\lambda_{пс}$ для исследованных материалов определялись по корреляционному соотношению вида [18]

$$\frac{\lambda_{пс}}{\lambda_{т}} = \frac{\lambda_{эк}}{\lambda_{т}} + B_{э} (Re_{э} Pr_{г}) \quad (2)$$



где $\lambda_{\text{пс}}$ – теплопроводность псевдоожигаемого слоя при вынужденном конвективном потоке газа; $\lambda_{\text{эк}}$ – истинная теплопроводность того же слоя в стационарном состоянии при отсутствии фильтрации газа, $\lambda_{\text{т}}$ – истинная теплопроводность частиц материала (первом приближении принимается по справочным данным, или $\lambda_{\text{эк}}$ и $\lambda_{\text{т}}$ определялись экспериментально).

Эквивалентное значение критерия Рейнольдса

$$\begin{aligned} \text{Re}_{\text{э}} &= (4\Phi \text{Re}_{\text{эг}} / (6(1 - \varepsilon_{\text{пс}}))) \\ \text{Re}_{\text{эг}} &= (v_{\text{г}} d_{\text{экв}_{50}} / \nu_{\text{г}}) \\ v_{\text{г}} &= v_{\text{ср}} / (1 - \varepsilon_{\text{пс}}) \end{aligned} \quad (3)$$

где $v_{\text{ср}}$ – среднерасходная скорость газа в «живом» сечении теплообменника, м/с, $\varepsilon_{\text{пс}}$ – порозность псевдоожигаемого слоя для исследуемых материалов и конструкции теплообменника в аэродинамическом режиме, определяемая экспериментально.

Φ – коэффициент сферичности частиц объемом $V = (\pi d_{\text{экв}_{50}}^3 / 6)$ и эквивалентным среднемедианным миделевым сечением $S_{\text{экв}_{50}}$ со среднемедианным эквивалентным размером гранулы-частицы $d_{\text{экв}_{50}}$, находится по соотношению

$$\Phi = (\pi d_{\text{экв}}^2 / (4S_{\text{экв}_{50}})) \quad (4)$$

Наиболее надежным способом определения величины критерия Рейнольдса $\text{Re}_{\text{ре}_{50}}$ является расчет по результатам экспериментальных данных измерением скорости газа, например, на входе в устройство или выходе из слоя. В данном случае значение критерия относится к соответствующему месту устройства, где проводились измерения.



В результате статистической обработки данных результатов значительного числа серий экспериментов, выполненных на лабораторной установке с исследуемой конструкцией теплообменника [10-13], получены уточненные регрессионные зависимости для ряда материалов. При этом значение коэффициентов допустимо принимать $n=0,33$ в регрессии (1) [16-17]. Значение параметрических коэффициентов A , B и m изменяется в зависимости от вида исследованных материалов и варьируемой высоты теплообменника, слоя и их соотношения. Величина диаметра теплообменника при его масштабировании должна приниматься неизменной, но их число «ячеек» должно увеличиваться для достижения требуемой его производительности.

Величины теплопроводности $\lambda_{\text{пс}}$, среднемедианного эквивалентным размером гранулы-частицы материала слоя $d_{\text{экв } 50}$ и параметра $B_{\text{э}}$, порозности $\varepsilon_{\text{пс}}$ для исследуемых материалов и конструкции теплообменника в исследованном диапазоне аэродинамических режимов определены экспериментально.

Выводы

1. Результатом выполненных и представленных в работе исследований являются уточненные регрессионные соотношения обобщенного типа для зависимости критерия Нуссельта $\text{Nu}_{\text{пс}}$ с целью определения коэффициента теплоотдачи от частиц псевдооживленного слоя $\alpha_{\text{пс}}$ предложенной конструкции теплообменника. Полученные на основании расчетов значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{\text{пс}}$ по системе соотношений (1)- (4) имеют хорошее совпадение с результатами измерений.

2. Одним из наиболее эффективных технических мероприятий по сокращению снижению потерь тепла, выбрасываемого нагретыми газоздушными потоками систем аспирации, и снижению теплового



загрязнения атмосферы представляется установка высокоэффективных теплообменников для нагрева воды систем горячего водоснабжения и местного отопления предприятий стройиндустрии.

Литература

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. 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.

4. 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

5. 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.

6. 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.

7. Kunii D., Levenspiel O. Fluidization engineering. Elsevier, 2013, 179 p.



8. 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.

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

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

11. Koshkarev, S.A. A.I. Evtushenko, Pushenko, S.L. Evaluation of solid particles slippage' amount throw out wet dust cleaning device in the dust removal system in building industry. Procedia Eng. 2016. V.165. Pp.1057 – 1069.

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

13. Патент №161262 Россия, МКІ U1 B01D 46/38. Аппарат псевдооживленного слоя/ Кошкарев, С. А. и др. Заявка № 2015139314/05. Опубл. 10.04.2016, бюлл. № 10.

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

15. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 206 с.

16. Hsu, N.T. Thermal and material transfer in turbulent gas streams: local transport from spheres / N.T. Hsu, В.Н. Sage // A. I. Ch. E. Journal, 1957, V.3, N 3. Pp. 405-410.

17. Химвинга, Мвине. Повышение эффективности очистки пылегазовой смеси в аппарате распылительного типа.: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Воронеж. ТГТУ, 2016. 18 с.



18. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1979. 176 с.

References

1. Smirnov, R.V., Bahvalov, Ju.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.
- 2 Romanova, M.I., Sherstjukov, V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1440.5.
3. Petrenko, V.N., Mokrova, N.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1617.
4. Basu P., Nag P. K. Chemical Engineering Science. 1996. V. 51. №. 1. Pp.1-26.
5. Habib B., Farid M. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2006. V. 45. №. 8. Pp.698-710.
6. Pronk P., Ferreira C. A. I., Witkamp G. J. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. №. 15. Pp.3857-3868.
7. Kunii D., Levenspiel O. Fluidization engineering. Elsevier. 2013. 179 p.
8. Roshchin, P.A, et al. Vestnik VolgGASU. Izdatelstvo VolgGASU.
9. Roshchin, PA et al. Vestnik VolgGASU. Volgograd. 2011. Vyp.25 (№44). Pp 208-211.
10. Koshkarev, S.A., Roshhin, P.A. Jekonomika. Biznes. Banki. 2016. № 1 (14). Pp. 123-132. 11. Koshkarev, S.A. Evtushenko, A.I., Pushenko, S.L. Procedia Eng. 2016. V.165. Pp.1057 – 1069.
12. 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. [Rus]



13. Patent №161262 Rossiya [Russia], MKI U1 B01D 46/38. Apparat psevdoozhizhennogo sloja [The fluidized bed apparatus]. Koshkarev, S.A. et al, Zajavka № 2015139314/05. Publ. 10.04.2016, Bul. № 10.
14. Kjejs, V.M. Konvektivnyj teplo- i massoobmen [Convective heat and mass transfer]. M.: Jenergija, 1972. 448 p.
15. Frolov, V.F. Modelirovanie sushki dispersnyh materialov [Modeling drying of dispersed materials]. L.: Himija, 1987. 206 p.
16. Hsu, N.T. Thermal and material transfer in turbulent gas streams: local transport from spheres. A. I. Ch. E. Journal. 1957. V.3. N 3. Pp. 405-410.
17. Himvinga, Mvine. Povyshenie jeffektivnosti ochistki pylegazovoj smesi v apparate raspylitel'nogo tipa.: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.17.08. Voronezh. TGTU, 2016. 18 p.
18. Ajerov M.Je., Todes O.M., Narinskij D.A. Apparaty so stacionarnym zernistym sloem. Gidravlicheskie i teplovyje osnovy raboty [Devices with a stationary granular bed. Hydraulic and thermal foundations work]. L.: Himija, 1979. 176 p.