

Научная статья
УДК 532.546

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБОЙ И ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

Сергей Васильевич Звягин¹, Ольга Борисовна Пушкарева²

^{1,2} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

¹ zvyaginsv@m.usfeu.ru

² pushkarevaob@m.usfeu.ru

Аннотация. Изучался теплообмен в кипящем (псевдоожигенном) слое между цилиндрической трубой и слоем. Исследования дают возможность оптимизировать расположение трубного пучка в слое и режимы псевдоожигения.

Ключевые слова: кипящий (псевдоожигенный) слой, коэффициент теплообмена, трубный пучок

Для цитирования: Звягин С. В., Пушкарева О. Б. Исследование теплообмена между цилиндрической трубой и псевдоожигенным слоем // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 273–277.

Original article

RESEARCH ON HEAT EXCHANGE BETWEEN A CYLINDER PIPE AND A FLUIDIZED BED

Sergey V. Zvyagin¹, Olga B. Pushkareva²

^{1,2} Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ zvyaginsv@m.usfeu.ru

² pushkarevaob@m.usfeu.ru

Abstract. Heat exchange in a boiling (fluidized) bed between a cylindrical pipe and a bed was researched. Research makes it possible to optimize the location of the pipe bundle in the bed and the modes of fluidization.

Keywords: boiling (fluidized) bed, heat transfer coefficient, tube bundle

For citation: Zvyagin S. V., Pushkareva O. B. (2026) Issledovanie teploobmena mezhdru cilindricheskoj truboj i psevdoozhizhenny`m sloem [Research on heat exchange between a cylinder pipe and a fluidized bed]. Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies] : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 273–277. (In Russ).

Процесс горения торфа и древесных отходов (коры, ошлок) возможен как в слоевых топках, так и в топках с кипящим (псевдоожигенным) слоем.

Как показывают исследования передачи тепла от кипящего слоя к нагреваемой воде в пучке труб, помещенном в слой [1, 2], интенсивность передачи тепла в кипящем слое значительно выше, чем в неподвижном слое. Процесс горения древесных отходов в кипящем слое характеризуется тем, что основную массу слоя составляет зола или другой инертный материал, в то время как масса древесного топлива составляет обычно меньшую часть всей массы кипящего слоя.

Равномерность температурного поля в топках с кипящим слоем обеспечивается интенсивным перемешиванием материала кипящего слоя ожигающим его воздухом, подаваемым снизу топки. Воздушные пузыри, проходящие через слой, интенсифицируют передачу тепла от сжигаемого топлива к трубному пучку с нагреваемой водой [3].

Как показывают эксперименты, локальные коэффициенты теплоотдачи по периметру горизонтальных труб, погруженных в кипящий слой, неодинаковы. Эти различия связаны с неоднородностью гидродинамики кипящего слоя вблизи теплоотдающей поверхности, которая в свою очередь обусловлена изменением скорости фильтрации газа при погружении в слой тела. Когда порозность по объему слоя постоянна, что имеет место до начала псевдоожигения, а размер частиц невелик и сопротивление течению газа пропорционально его скорости, распределение скоростей фильтрации вблизи тела можно найти аналитически, поскольку в этом случае тело обтекается потенциальным потоком несжимаемой жидкости. Зависимость для вертикальной составляющей скорости фильтрации при обтекании эллиптического горизонтального цилиндра определяется дифференцированием потенциала скорости по вертикальной координате [4]. Максимальная скорость фильтрации имеет место около поверхности цилиндра в экваторной зоне, причем чем больше отношение высоты эллипсоида к его ширине, тем меньше скорость у его поверхности отличается от скорости вдали от него.

В случае круглого цилиндра максимальная скорость около его поверхности в 2 раза больше скорости невозмущенного потока.

Экспериментальные данные [5] показывают, что псевдоожигение вблизи боковой поверхности (у экватора цилиндра), действительно

начинается при $W = 0,5$. Очевидно, что локальные очаги псевдооживления возникают при несколько большей скорости, поскольку скорость газа должна быть больше критической не только непосредственно у поверхности, но и вдали от нее по меньшей мере на один диаметр частиц.

За счет локального псевдооживления интенсивность теплоотдачи от боковых участков поверхности горизонтальной трубы возрастает уже при $W < 1$ [5].

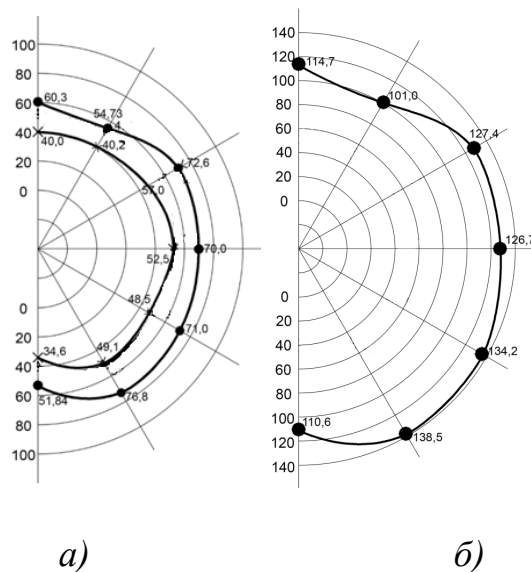
Скорости и динамический напор газа около лобовой (по ходу газа) и кормовой зон цилиндра равны нулю, поэтому в процессе псевдооживления частицы плотным слоем лежат на кормовых участках поверхности цилиндра, а в лобовой зоне они отходят от поверхности цилиндра вниз и под цилиндром образуется газовая полость, которая периодически исчезает. Это связано с тем, что сопротивление движению газа в полости, образующейся около нижней поверхности цилиндра, резко уменьшается и в нее устремляется газ, захватывая с собой частицы мелкозернистого материала. При этом газовая полость под цилиндром смыкается, газ в виде пузыря поднимается вверх, а поле скоростей фильтрации газа вблизи цилиндра перестраивается в прежнее состояние, что вновь ведет к образованию газовой полости. Таким образом картина периодически повторяется.

Перестройка линий тока газа (жидкости) вблизи горизонтального цилиндра при переходе слоя в псевдооживленное состояние была установлена экспериментально [5]. Линии тока в псевдооживленном состоянии уже не огибают цилиндр, а как бы втекают в него.

Значительное время контакта нижней части поверхности горизонтального цилиндра с чисто газовой фазой сдерживает рост коэффициента теплоотдачи при увеличении скорости псевдооживления. В то же время теплоотдача кормовой зоны горизонтального цилиндра, которая практически не соприкасается с чисто газовой фазой, возрастает при увеличении W , так как растет частота смены пакетов частиц на поверхности цилиндра (частота сбрасывания «шапки» с поверхности омывающими цилиндр пузырями).

Для изучения теплообмена между псевдооживленным слоем инертного материала (корунда) и пучком горизонтальных труб использовалась теплоизолированная установка размерами $0,34 \times 0,28 \times 0,85$ м. Снизу подавался через решетку воздух, расход которого измерялся расходомером. Высота слоя корунда изменялась от 300 до 500 мм. В слой погружался пучок горизонтальных труб диаметром 32 мм, размещенных в шахматном порядке, с шагом по горизонтали 1...6 и по вертикали 2...4. Вместо одной из труб пучка размещался датчик – калориметр. Тепловой поток от калориметра регулировался величиной тока нагревателя. Температуры кипящего слоя и цилиндрической поверхности калориметра измерялись с помощью термопар.

Распределение коэффициентов теплоотдачи по периметру цилиндрической трубы диаметром 32 мм показано на рисунке.



Зависимость коэффициента теплоотдачи от места расположения на поверхности трубы:

- а) • – $v = 0,9$ м/с, $\alpha_{\text{ср}} = 71$ Вт/м²·К; Δ – $v = 0,80$ м/с,
 $\alpha_{\text{ср}} = 56$ Вт/м²·К; \times – $v = 0,7$ м/с, $\alpha_{\text{ср}} = 53$ Вт/м²·К; диаметр корунда – 1 мм;
 б) диаметр частиц корунда 0,5 мм; $W = 2$

Возрастание скорости псевдооживления частиц корунда размером 1 мм ведет к увеличению средних значений коэффициентов теплоотдачи. Вследствие продолжительного контакта нижней (лобовой) части цилиндрической трубы с газовыми пузырями в этой области коэффициенты теплоотдачи ниже средних по периметру. Смена газовой фазы (пузыри) плотным слоем (частицы) приводит к различным значениям коэффициента теплоотдачи по периметру цилиндрической трубы. В то время, когда в лобовой (нижней) части цилиндра возникает газовая полость, в кормовой (задней) части частицы лежат плотным слоем.

Уменьшение размера частиц корунда с 1 мм до 0,5 мм приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи по всему периметру цилиндрической трубы в 2 раза. Также увеличивается равномерность коэффициентов теплоотдачи по периметру цилиндра.

Диаметр цилиндрической трубы также влияет на теплоотдачу. Уменьшение диаметра приводит к тому, что газовая фаза в лобовой части меньше по времени омывает поверхность трубы, в то время как плотная фаза в кормовой части сбрасывается чаще.

Изучение влияния скорости псевдооживления, размера частиц и диаметра цилиндрических труб позволяет выбрать оптимальные режимы псевдооживления, диаметр частиц и размещение трубных пучков в топках с кипящим слоем, сжигающих опилку, кору или другие древесные отходы.

Список источников

1. Карапетов А. Э. Сжигание биотоплив в топках кипящего слоя // Академия энергетики. Издательство : Издательский Дом «Президент-Нева», 2016. № 2. С. 46–55.
2. Теплотехника / под ред. А. П. Баскакова. М. : Энергоиздат, 1991. 224 с.
3. Брдлик П. М. Теплотехника и теплоснабжение предприятий лесной и деревообрабатывающей промышленности. М. : Лесная промышленность, 1988. 453 с.
4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. М. : Физматгиз, 1963. 583 с.
5. Davidson I. E., Harrison D. Fluidization. Academic Press, 1971. 847 p.

References

1. Karapetov A. E. Combustion of biofuels in fluidized bed furnaces // Academy of Power Engineering. Publisher : President-Neva Publishing House, 2016. № 2. P. 46–55.
2. Thermal Engineering / ed. by A. P. Baskakov. M. : Energoizdat, 1991. 224 p.
3. Thermal Engineering and Heat Supply for Forest and Woodworking Industry Enterprises. Brdlik P. M. M. Forest industry, 1998.
4. Kochin N. E., Kibel I. A., Roze N. V. Theoretical hydromechanics. P. 1. M. : Fizmatgiz, 1963. 583 p.
5. Davidson I. E., Harrison D. Fluidization. Academic Press, 1971. 847 p.