

Научная статья  
УДК 541.182

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБНОМ ПУЧКЕ ТОПКИ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

**Сергей Васильевич Звягин<sup>1</sup>, Ольга Борисовна Пушкарева<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Уральский государственный лесотехнический университет,  
Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> zvyaginsv@m.usfeu.ru

<sup>2</sup> pushkarevaob@m.usfeu.ru

*Аннотация.* В статье исследовался перенос тепла от кипящего слоя к трубному пучку для нагрева воды. Исследования позволяют оптимизировать режимы псевдооживления и расположение труб в кипящем слое.

*Ключевые слова:* кипящий слой, трубный пучок, теплообмен

Original article

## RESEARCH OF HEAT EXCHANGE IN PIPE BUNDLE FLUIDIZED BED FURNACE

**Sergey V. Zvyagin<sup>1</sup>, Olga B. Pushkareva<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> zvyaginsv@m.usfeu.ru

<sup>2</sup> pushkarevaob@m.usfeu.ru

*Abstract.* Heat transfer from fluidized bed to pipe bundle for heating water studied. Studies allow to optimize fluidization modes and location of pipes in fluidized bed.

*Keywords:* fluidized bed, pipe bundle, heat exchange

По сравнению со слоевыми топками, в которых сжигаются древесные отходы, кора, опилки или торф, топки с кипящим слоем отличаются более интенсивным теплообменом между материалом слоя и трубным пучком с нагреваемой водой [1, 2]. Обычно при сжигании древесного топлива в кипящем слое его масса составляет небольшую долю от общей массы слоя, т. к. большой объем кипящего слоя занимает зола или другой инертный материал. Частицы горячего инертного материала интенсивно перемешиваются воздухом, подводимым под решетку, что обеспечивает равномерность

температуры по объему топки и интенсивную передачу тепла трубному пучку [3].

Установка для исследования теплообмена между кипящим слоем и трубным пучком представляла собой короб сечением  $340 \times 280$  мм, высотой 850 мм. Снизу через удерживающую решетку подавался воздух для псевдооживления. Высота кипящего слоя изменялась от 300 до 500 мм. Пучок горизонтальных труб диаметром 32 мм располагался в шахматном порядке. Шаги труб: горизонтальный – от 1 до 6, вертикальный – от 2 до 4. Датчик (калориметр) устанавливался в трубном пучке на месте одной из труб. Тепловой поток калориметра регулировался величиной подаваемого тока. Температурное поле на поверхности калориметра и в кипящем слое измерялось термопарами.

Экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи по периметру цилиндрической трубы получены на установке для частиц корунда размером 1 мм (рис. 1, а, б). Увеличение числа псевдооживления приводит к повышению средних по периметру значений коэффициента теплоотдачи. В передней (лобовой) части цилиндра коэффициент теплоотдачи имеет меньшее среднее значение вследствие значительной продолжительности контакта поверхности с газовой фазой слоя.

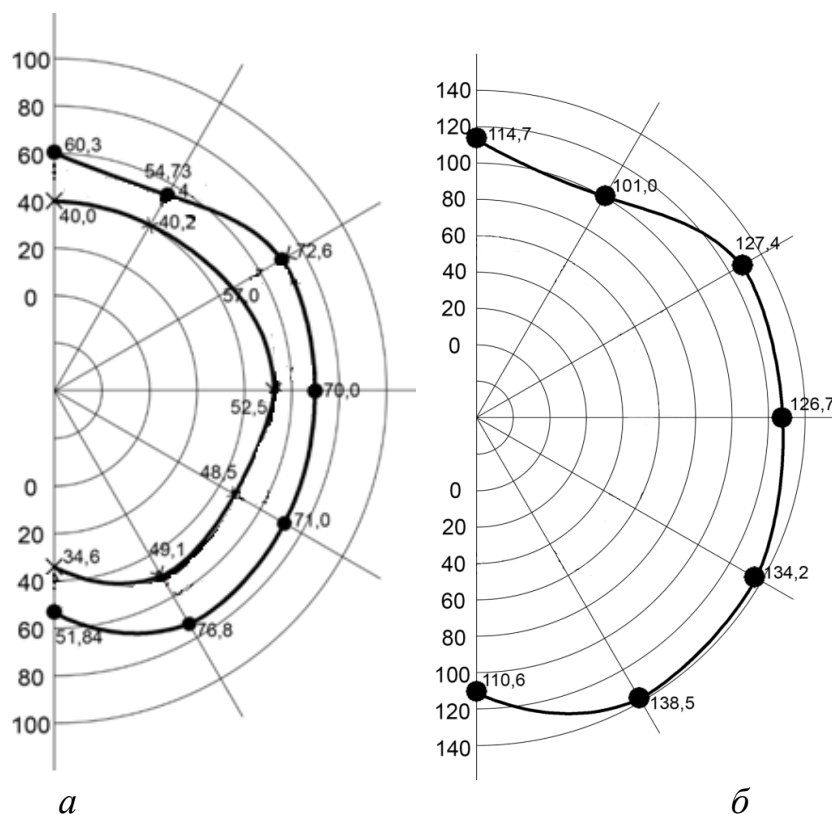


Рис. 1. Коэффициент теплоотдачи по периметру цилиндрической трубы:  
 а)  $\bullet$  —  $\omega = 0,9$  м/с,  $\alpha_{\text{ср}} = 71$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta$  —  $\omega = 0,80$  м/с,  $\alpha_{\text{ср}} = 56$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\times$  —  $\omega = 0,7$  м/с,  $\alpha_{\text{ср}} = 53$  Вт/м<sup>2</sup>·К; б) число псевдооживления  $W = 2$ , размер частиц  $\bullet$  — корунд 0,5 мм

Трубный пучок, погруженный в кипящий слой, вызывает неоднородность гидродинамики вблизи поверхности горизонтальной трубы, что приводит к неодинаковым значениям локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру трубы. В лобовой (нижней) части цилиндрической трубы образуется газовая полость, в кормовой (задней) части цилиндра частицы лежат плотным слоем.

Скорость псевдооживления значительно влияет на теплоотдачу в боковой области цилиндрической трубы: коэффициент теплоотдачи растет с увеличением скорости псевдооживления и улучшением перемешивания материала слоя. В то же время возрастающая породность слоя сдерживает дальнейшее увеличение коэффициента теплоотдачи в этой зоне трубы.

Опыты показали, что в боковой области цилиндрической трубы наблюдается интенсивное движение материала, вызванное движением пузырей воздуха в кипящем слое. В этой области локальный коэффициент теплоотдачи имеет максимальные значения. В кормовой области за счет увеличения размера пузырей с увеличением скорости псевдооживления коэффициент теплоотдачи также увеличивается.

С ростом скорости псевдооживления коэффициент теплоотдачи в нижней части цилиндра растет незначительно, т. к. увеличивается время контакта поверхности трубы с чисто газовой фазой. В кормовой (верхней) части горизонтальной цилиндрической трубы теплоотдачи с ростом скорости псевдооживления увеличивается вследствие частоты сбрасывания «шапки» частиц с поверхности пузырями воздуха.

Размер частиц кипящего слоя также влияет на коэффициент теплоотдачи: при уменьшении размера частиц корунда с 1,0 мм до 0,5 мм локальный коэффициент теплоотдачи увеличивается. Также улучшается равномерность распределения коэффициента теплоотдачи по периметру.

Увеличение числа псевдооживления является основным фактором улучшения равномерности коэффициента теплообмена по периметру и достижения максимальной теплоотдачи. При этом обеспечивается разрушение газовой полости в лобовой части цилиндра и сбрасывание «шапки» материала в его кормовой части.

Уменьшение диаметра горизонтального цилиндра в кипящем слое приводит к тому, что газовая полость под цилиндром меньше время соприкасается с поверхностью трубы, а «шапка» в верхней части трубы сбрасывается чаще. Вследствие этого коэффициенты теплоотдачи в нижней (лобовой) части и особенно в верхней (кормовой) части цилиндра возрастает.

В боковой области цилиндрической трубы наблюдается рост коэффициента теплоотдачи с увеличением скорости псевдооживления. Также улучшается перемешивание материала слоя. В то же время возрастающая породность слоя сдерживает дальнейшее увеличение коэффициента теплоотдачи в этой зоне трубы.

Увеличение диаметра цилиндрической трубы приводит к увеличению локального коэффициента теплоотдачи в боковой части (рис. 2). В лобовой и кормовой части теплоотдача остается на том же уровне.

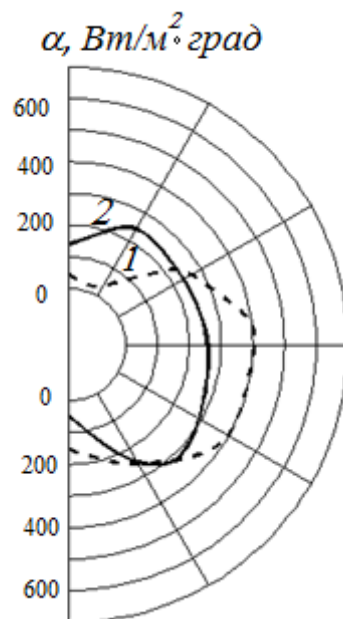


Рис. 2. Изменение локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по периметру горизонтальной трубы: 1 –  $\omega = 0,3 \text{ м/с}$ ,  $d = 220 \text{ мм}$ ; 2 –  $\omega = 0,3 \text{ м/с}$ ,  $d = 125 \text{ мм}$ .

Экспериментальные данные теплообмена между цилиндрической трубой в трубном пучке и кипящим слоем показывает влияние на коэффициент локального теплообмена скорости псевдооживления и размера частиц слоя и диаметра труб трубного пучка. Они позволяют выбрать режимы псевдооживления и оптимальное расположение трубных пучков в топках кипящего слоя, в которых сжигаются опилки, кора и другие отходы.

### Список источников

1. Карапетов А. Э. Сжигание биотоплив в топках кипящего слоя // Академия энергетики. 2016. № 2 (70). С. 46–55.
2. Теплотехника : учебник для вузов / под ред. А. П. Баскакова. М. : Энергоиздат, 1991. 224 с.
3. Брдлик П. М., Морозов А. В., Семенов Ю. П. Теплотехника и теплоснабжение предприятий лесной и деревообрабатывающей промышленности : учебник. М. : Лес. пр-сть, 1998. 462 с.