

В. П. ХОДУНКОВ

КАЧЕСТВО ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ: ПУТЬ К ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Показана связь качества псевдоожигения с характеристиками теплопереноса псевдоожигенного слоя. Приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ в целях практического использования для диагностики промышленных аппаратов.

Ключевые слова: качество псевдоожигения, диагностика, коэффициент диффузии, эффективность перемешивания, частота тепловых колебаний.

Введение. Для технологических процессов, проводимых с использованием псевдоожигенного (кипящего) слоя, определяющее значение имеет оптимальная организация движения дисперсного материала. Обобщенной характеристикой гидродинамических и теплообменных процессов в слое является качество псевдоожигения.

В настоящее время известны несколько способов оценивания указанного параметра. Один из первых предложен в работе [1], где качество псевдоожигения определяется по формуле

$$\xi = \beta \vartheta_{pv} / U_f, \quad (1)$$

где $\vartheta_{pv} = H_0 R / \tau$ — вертикальная скорость частиц слоя, м/с; H_0 — высота слоя при минимуме псевдоожигения, м; τ — время прохождения частицами вертикального габарита слоя, с; R — степень расширения слоя; β — численная постоянная, определяемая экспериментально; U_f — скорость фильтрации газа через слой, м/с.

Другой способ [2] предусматривает определение качества псевдоожигения по формуле

$$\xi = (1 - \varepsilon) \sqrt{f_0 f_t}, \quad (2)$$

где ε — порозность псевдоожигенного слоя; f_0, f_t — частоты флуктуаций порозности и температуры слоя соответственно, Гц.

Оба способа в достаточной степени адекватны процессу, в то же время какие-либо жесткие связи введенного параметра ξ с основными характеристиками псевдоожигенного слоя (коэффициентом перемешивания, эффективной теплопроводностью и др.) в них не установлены.

Параметр качества псевдооживления, в первую очередь, должен характеризовать интенсивность перемешивания твердой фазы в кипящем слое (КС). Поскольку в кипящем слое эффективная температуропроводность $a_{эф}$ и коэффициент перемешивания $D_{см}$ практически тождественны: $a_{эф} = D_{см}$ [3], установление связи параметра качества псевдооживления с данными характеристиками приобретает еще большую актуальность. Сложность решения задачи усугубляется отсутствием единого подхода к определению коэффициента перемешивания. Измеренные разными авторами значения $D_{см}$ для различных условий отличаются на 2—3 порядка и более. В теоретических же исследованиях величина $D_{см}$ связывается только с параметрами газовых пузырей слоя или предлагаются корреляции между критериальными числами, содержащими внутренние параметры самого кипящего слоя, но не аппарата.

Второе обстоятельство, влияющее на сложность решения задачи, заключается в том, что значения $D_{см}$ в крупномасштабных промышленных аппаратах значительно превышают значения $D_{см}$, измеренные в лабораторных установках малого диаметра. Это указывает на тесную связь интенсивности перемешивания с циркуляционными потоками твердой фазы. К сожалению, никому из исследователей, предлагавших различные корреляции для коэффициента $D_{см}$, не удалось корректно отразить влияние масштаба аппарата с кипящим слоем на величину $D_{см}$.

Цель исследования, описываемого в настоящей статье, — установление связи параметра качества псевдооживления ξ с эффективной температуропроводностью слоя $a_{эф}$, коэффициентом перемешивания $D_{см}$ и масштабами аппарата с КС, а также определение физической сущности и практической значимости введенного параметра качества псевдооживления.

Решение. Известно, что при обычной молекулярной диффузии в газе коэффициент диффузии равен $D_r = 1/3\vartheta l$, где ϑ — средняя скорость хаотического движения молекул, l — средняя длина свободного пробега молекул; при нормальных условиях $D_r = 10^{-5}$ м²/с.

Для потока, турбулизируемого движущимися массами твердой фазы, сохраняется структура выражения для эффективного коэффициента перемешивания, но абсолютное его значение на несколько порядков выше, чем в газе [3]:

$$D_{см} = a_{эф} = \varphi \vartheta_p L_{ц}, \quad (3)$$

где ϑ_p — средняя циркуляционная скорость масс твердой фазы, м/с; $L_{ц}$ — основной масштаб пульсаций (путь смешения — циркуляции), м; $\varphi \cong 0,1$ — численный коэффициент.

Для псевдооживленных систем основной масштаб пульсаций $L_{ц}$ определяется геометрическими размерами слоя — диаметром аппарата $2R$ и насыпной высотой слоя H_0 , а его предельное значение равно (рис. 1)

$$L_{ц\max} = 2(H_0 N + 2R), \quad (4)$$

где N — количество циркуляционных контуров.

Средняя циркуляционная скорость ϑ_p масс твердой фазы определяется частотой f_0 гравитационных колебаний, габаритами слоя, структурными параметрами, технологическими и конструктивными особенностями аппарата. Поэтому теоретическое предсказание величины ϑ_p весьма затруднительно, да и не целесообразно ввиду некорректности любых применяемых моделей и упрощений, изначально имеющих высокую погрешность. Все известные рас-

четные соотношения для ϑ_p получены на основе обобщения экспериментальных данных. Так, в работах [3, 4] предложена следующая формула:

$$\vartheta_p \approx \varphi_1 f_0 H_0, \tag{5}$$

где $\varphi_1 = 0,816$.

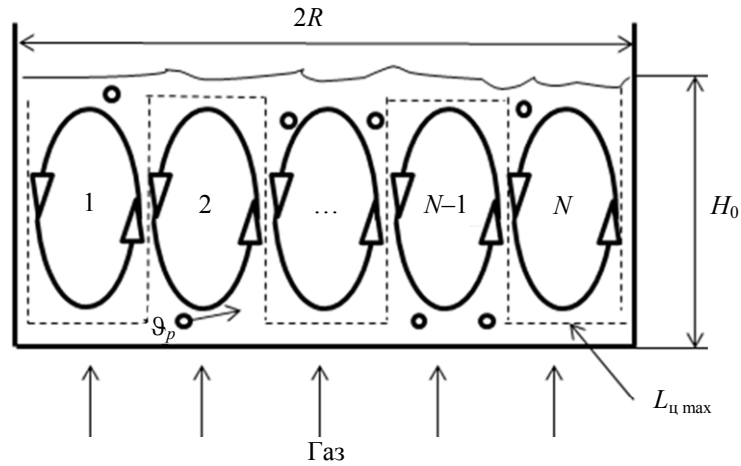


Рис. 1

Рассмотрим новое соотношение для $a_{эф}$, $D_{см}$. В результате многочисленных экспериментов, выполненных на установках различного масштаба (от 0,2 до 9 м), выявлено наличие низкочастотной составляющей в спектре флуктуаций температуры и теплового потока на границе раздела псевдооживленный слой — поверхность [5, 6]. Значения частоты f_t тепловых колебаний на порядок меньше значений частоты f_0 гравитационных колебаний слоя (рис. 2). Наличие низкочастотной составляющей f_t обусловлено неравномерностью температурного поля в объеме аппарата и процессом перемешивания материала. Как следует из экспериментальных данных, отношение частот стремится к значению $2(H_0 N + 2R) / H_0$. Характер изменения величин f_0 , f_t и зависимость частоты f_0 от масштаба аппарата хорошо описываются известной формулой [3]

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{g / H_0}, \tag{6}$$

где g — ускорение свободного падения.

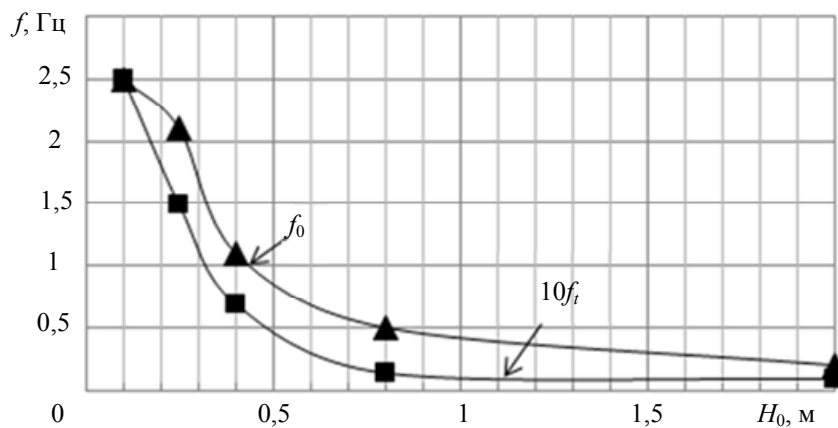


Рис. 2

Масштаб пульсаций $L_{ц}$ может быть выражен через указанную выше частоту f_t тепловых колебаний слоя:

$$L_{ц} = \mathfrak{D}_p / f_t. \quad (7)$$

Здесь следует особо отметить, что тепловые флуктуации (температуры, теплового потока) в каждом конкретном аппарате происходят в широком спектре частот в диапазоне 10^{-3} —10 Гц в зависимости от размеров слоя [5]. Из выражений (3), (5) и (7) следует

$$D_{см} = a_{эф} = \varphi \varphi_1^2 H_0^2 f_0^2 / f_t. \quad (8)$$

С другой стороны, коэффициент перемешивания можно выразить через эффективное сечение переноса $S_{эф} = L_{ц}^2$, тогда

$$D_{см} = a_{эф} = S_{эф} f_t = L_{ц}^2 f_t. \quad (9)$$

Используя формулы (8), (9), получаем следующие соотношения:

$$S_{эф} = \varphi \varphi_1^2 H_0^2 \frac{f_0^2}{f_t^2} \Rightarrow L_{ц} = \varphi_1 \sqrt{\varphi} \cdot H_0 \frac{f_0}{f_t}.$$

Входящее в данные выражения отношение f_0 / f_t назовем параметром качества псевдооживления ξ .

Физическая сущность введенного здесь параметра: „*качество псевдооживления характеризует площадь эффективного сечения, в котором происходит активное перемешивание твердой фазы, при этом чем выше значение параметра качества, тем бóльшая часть слоя в технологическом аппарате находится в интенсивном гидродинамическом и тепловом режимах*“.

В случае идеального перемешивания $L_{ц} = L_{ц\max}$, тогда с учетом выражения (4) получаем

$$\frac{L_{ц}}{L_{ц\max}} = \varphi_1 \sqrt{\varphi} \cdot \frac{H_0}{2(H_0 + 2R)} \frac{f_0}{f_t} = \eta,$$

где η — новый вводимый термин — эффективность перемешивания.

С учетом известных значений $\varphi_1 = 0,816$, $\varphi = 0,1$ получаем расчетную формулу:

$$\eta = 0,129 \frac{H_0}{H_0 + 2R} \xi.$$

По величине η можно судить о том, какая часть (доля объема) слоя участвует в активном перемешивании, что в дальнейшем важно для диагностики аппаратов с кипящим слоем.

Экспериментально-диагностические исследования. С использованием методик и средств измерения, разработанных в исследовательской лаборатории кафедры теплофизики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики [6—8], был проведен сравнительный анализ характеристик различных лабораторных установок и промышленных аппаратов. Полученные результаты представлены в таблице, где \bar{f}_0 , \bar{f}_t — усредненные значения измеренных частот.

Тип аппарата, место установки	$2R$, м	H_0 , м	\bar{f}_0 , Гц	\bar{f}_t , Гц	N	ξ	$\eta \cdot 100\%$	$a_{эф} = D_{см}$, м ² /с
Лабораторная установка с КС	0,2	0,12	2,5	0,15	1	17	82	0,04
Лабораторная установка с КС	0,25	0,25	2,1	0,25	1	8	52	0,07
Обжиговая печь КС-450	9,0	1,8	0,2	0,008	4	25	36	1,08
Кристаллизатор-гранулятор	1,6	0,4	1,1	0,07	3	16	30	0,18
Топка с кипящим слоем	6,0	0,8	0,5	0,01	6	50	48	1,06

На рис. 3 представлен график распределения показателя эффективности перемешивания η по радиусу R аппарата (где R соответствует расстоянию от стенки аппарата).

Экспериментальные значения эффективной теплопроводности $a_{эф}$ рассчитывались по формуле (8), теоретические значения — по известной формуле [3]

$$a_{расч} = \frac{1}{60} \sqrt{gH_0^3} .$$

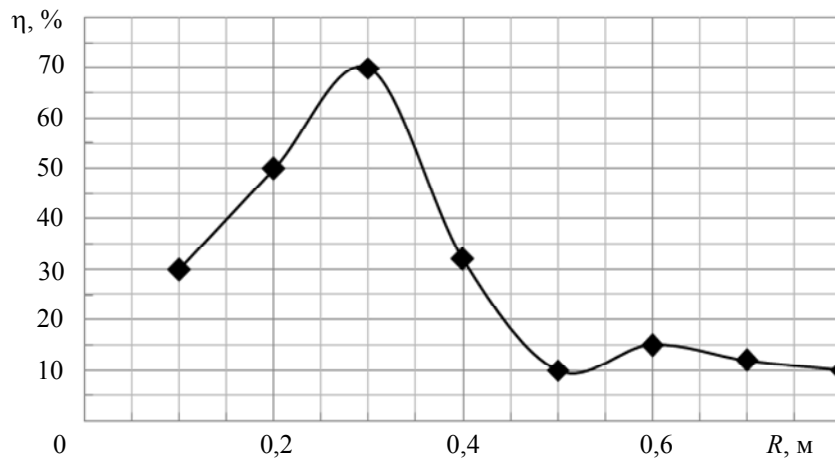


Рис. 3

Анализ результатов. Лабораторные установки, работающие при комнатных температурах и имеющие небольшие габариты, обеспечивают высокую эффективность перемешивания. Промышленные аппараты имеют меньшую эффективность, что связано с менее равномерным газораспределением, обусловленным конструкцией газораспределительной решетки. Однако существуют способы улучшения перемешивания слоя — в частности, введение в слой специальных активаторов или насадок: например, топка с кипящим слоем (см. таблицу) оснащена активизирующей перемешивание насадкой в виде „пучка“ труб, расположенных в шахматном порядке.

Эффективная теплопроводность слоя и коэффициента перемешивания, рассчитанные по измеренным частотам f_0 , f_i и формулам (8), (9) для $\varphi = 0,1$ и $\varphi_1 = 0,816$, имеют высокие значения, определяемые диапазоном $0,04—0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ для небольших аппаратов, но могут достигать и величин порядка $1,0 \text{ м}^2/\text{с}$ для крупных аппаратов. Следует заметить, что аналогичные высокие значения указанных параметров получены в работе [9].

Установлено, что эффективность перемешивания значительно изменяется вдоль сечения аппарата (см. рис. 3). Соотношение максимального и минимального значений η может достигать порядковых величин, что указывает на высокую неравномерность процессов теплопереноса в псевдооживленном слое, особенно в аппаратах промышленного масштаба. Это является следствием, в первую очередь, конструктивных недостатков аппаратов, а также неэффективной организации технологического процесса.

Заключение. Впервые обоснована целесообразность и физическая сущность введенного ранее параметра качества псевдооживления — показана его прямая связь с характеристиками теплопереноса. Особую практическую значимость представляет новый параметр — эффективность перемешивания, введение которого позволяет оптимизировать конструкцию промышленных аппаратов с псевдооживленным слоем и осуществлять качественное управление, обеспечивающее требуемую энергетическую эффективность технологического процесса и его ресурсосбережение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лева М. Псевдооживление. М.: Гостоптехиздат, 1961. 400 с.
2. А. с. 1170329 СССР. Способ количественной оценки качества псевдооживления / О. М. Тодес, В. Я. Чушев, О. Б. Цитович, Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев // Б.И. 1985. № 28.

3. Тодес О. М. Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1981. 296 с.
4. Ходунков В. П. Исследование теплообмена в псевдооживленном слое // XV Королевские чтения МФТИ: Сб. науч. тр. М., 1984. Деп. ВИНТИ. № 6660-84. С. 42—44.
5. Ходунков В. П. Устройство для анализа низкочастотных колебаний температуры // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1987. Т. 30, № 1. С. 90—92.
6. Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ключев В. М., Ходунков В. П. Методы и устройства для измерения структурно-гидродинамических и тепловых параметров псевдооживленных систем // Проблемные доклады Минск. междунар. форума по тепломассообмену. Минск: Ин-т тепломассообмена, 1988. С. 171—182.
7. Пилипенко Н. В. Динамический метод измерения эффективных температур и коэффициентов теплоотдачи в псевдооживленных слоях // Приборы. 2004. № 10. С. 37—39.
8. Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ходунков В. П. Теплофизические аспекты процесса псевдооживления в энергетических установках // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 83—89.
9. De Groot J. H. Proc. Intern. Symp. Fluidis, Eindhoven. Amsterdam, 1967. P. 348.

Сведения об авторе

Вячеслав Петрович Ходунков — канд. техн. наук; НИЦ по скрытности и защите кораблей ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, Санкт-Петербург;
E-mail: walkerearth@mail.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики и
энергофизического мониторинга
СПб НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
24.04.12 г.