

О.В. Постникова, Ю.В. Дружинина, А.С. Колтаков

Уральский государственный технический университет — УПИ, г. Екатеринбург, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В КОНДУКТИВНЫХ АППАРАТАХ С ВИБРООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты экспериментальных исследований теплоотдачи к греющей поверхности в виброожиженном слое, полученные по стационарной методике и методом регулярного режима. Показано, что интенсивность теплоотдачи достигает максимума при совпадении собственной частоты колебаний слоя с частотой вибрации. Отмечено, что зависимость коэффициентов от интенсивности внешнего воздействия имеет насыщающийся характер. Установлена взаимосвязь распределений коэффициентов теплоотдачи и порозности по высоте слоя. Выявлено, что размещенные в слое греющие поверхности представляют собой когерентные с дном источника колебаний и влияют на распределение коэффициентов теплоотдачи в слое.

При тепловой обработке склонных к агрегации мелкодисперсных ($d < 100$ мкм) порошков в аппаратах с активными гидродинамическими режимами наибольший эффект дают нестационарные воздействия, использующие работу расширения газа, сжимаемого в межчастичных промежутках [1]. Наиболее простым техническим решением в этом случае является наложение на слой частиц, не продуваемых стационарным газовым потоком, вынужденных колебаний за счет вертикальной вибрации корпуса аппарата.

Энергия, импульсно передаваемая слою дном виброаппарата, в течение цикла колебания трансформируется в энергию сжимаемой в межчастичных промежутках газовой или парогазовой фазы, вызывая эффект расширения и последующего взвешивания слоя. Для того чтобы с помощью гармонического воздействия достичь в такой системе устойчивого вторичного нелинейного эффекта, каким является расширение газодисперсной среды, необходимо генерировать в ней возмущения (пульсации давления газа и соответствующие им пульсации порозности) достаточной амплитуды с частотой, равной собственной частоте колебаний слоя [2]. В этом случае удельные энергозатраты на виброожижение становятся минимальными, обеспечивая максимальное перемешивание твердой фазы и высокие значения коэффициентов переноса в слое [1].

Собственные упругие колебания мелкодисперсного слоя связаны с наличием в нем газа и обязаны своему появлению силам вязкого трения между газом и частицами при колебательном движении. В слоях мелких частиц силы вязкого трения настолько

велики, что фильтрация газа за цикл колебания из слоя и обратно по расчетам ограничено возможна только в узкой приповерхностной зоне [3]. Таким образом, в основе свободных колебаний слоя, лежит сжимаемость парогазовой среды.

При возбуждении единичным импульсом затухающие свободные колебания существуют в течение длительного времени (до 30 сек), достигая размаха 30 кПа и проявляя себя в форме периодических флуктуаций верхней границы слоя [4]. Собственные частоты колебаний слоев, определенные экспериментально для материалов, существенно различающихся по плотности, хорошо коррелируют с расчетом по известной зависимости для упругих сред: $f_c = a/(4H)$, где f_c — частота собственных колебаний; a — скорость звука в дисперсной среде; H — высота слоя.

Наиболее эффективно применение метода вынужденных колебаний в резонансном режиме, когда за счет согласования частоты внешнего воздействия f с частотой собственных колебаний слоя f_c достигается многократное усиление амплитуды пульсационных характеристик, связанных со сплошной средой: полного давления слоя, порозности и, прежде всего, давления самого газа [5].

Естественным следствием резонанса является резкое увеличение диссипируемой слоем мощности. Значения мощности, определенные прямыми измерениями, в окрестностях пика ($f \approx f_c$) почти на порядок выше значений на крыльях острорезонансной кривой ($f < 0,5 f_c$ и $f > 1,5 f_c$) [4]. По понятным причинам таких же результатов следует ожидать и от характеристик теплопереноса.

Исследование, выполненное по методикам [5], обнаружило справедливость данного предположения (рис. 1а и б). При настройке системы на резонанс по методу изменения высоты слоя (рис. 1б) достигается острый резонанс вследствие отсутствия обычных для гетерогенных систем дисперсионных явлений, наблюдаемых при изменении частоты вибрации. Данная методика дает наиболее информативные результаты при низких уровнях вибрационного воздействия, когда процессы расширения слоя и последующего взвешивания имеют кризисный характер, и наблюдается скачок средних за период колебания давления газа p и порозности ϵ с переходом от одного устойчивого состояния слоя ($\epsilon < \epsilon_0$) к другому ($\epsilon > \epsilon_0$) (рис. 2).

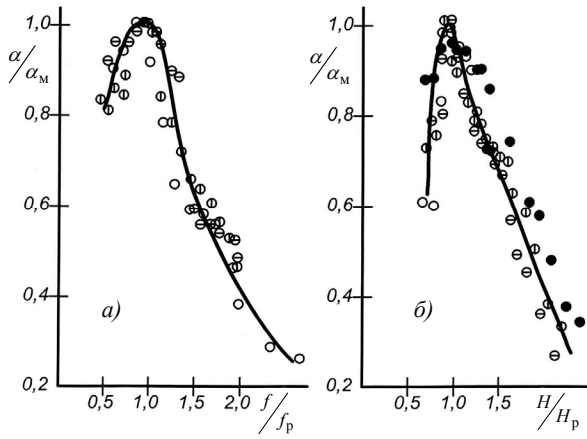


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от частоты вибрации (а) и высоты слоя (б): а — донный калориметр, $k = 4$; H , м: \circ — 0,16; \ominus и \oplus — 0,12; б — цилиндрический калориметр, $H = 0,12$ м; f , Гц; A , мм: \circ — 15; 2,0; \ominus — 20; 2,5; \oplus — 20; 3,5; \bullet — 35; 2,0

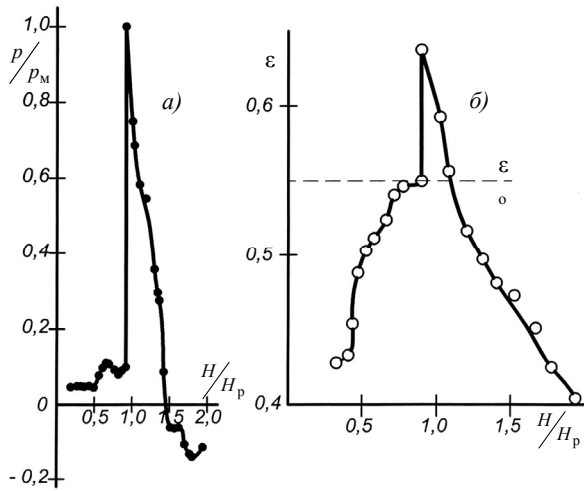


Рис. 2. Зависимость средних давления и порозности слоя от его высоты: $H = 0,16$ м; $f = 15$ Гц; $A = 2,5$ мм

Первое соответствует подвижному режиму виброоживления [4], когда средняя порозность ниже порозности стационарного слоя ϵ_0 . Следующее за кризисом состояние характеризуется заметным (на 15 %) расширением слоя и увеличением размаха пульсаций давления и среднего за период давления газа почти на порядок (взвешенный режим). Кризисный характер изменения гидродинамических характеристик имеет прямым продолжением такое же скачкообразное (почти вдвое) изменение коэффициентов теплоотдачи к поверхности нагрева (рис. 3а).

Расширение слоя и увеличение амплитудных значений пульсаций давления газа сами по себе не объясняют факта интенсификации теплообмена. Однако возникающие при этом колебания порозности дисперсной фазы виброоживленного слоя, будучи инициаторами развития структурных неоднородностей и вторичных циркуляционных течений, в большой степени влияют на интенсивность переноса теплоты между поверхностью нагрева и слоем.

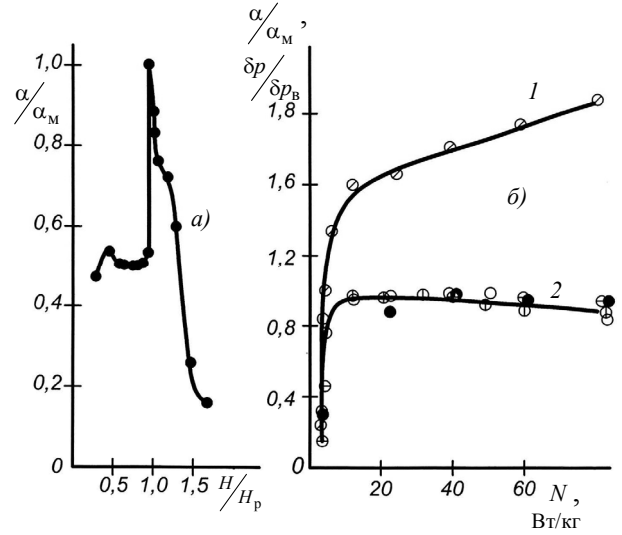


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты слоя (а) и зависимость коэффициента теплоотдачи и размаха пульсаций давления от мощности вибрации (б): а — $H = 0,18$ м; $A = 2,5$ мм; б — $H = H_p$; $f = 20$ Гц; тип калориметра: \bullet — донный; \circ — цилиндрический горизонтальный; \oplus — вертикальный в стенке; \oslash — плавающий; 1 — $\delta p/\delta p_B$; 2 — α/α_m

Переход от подвижного режима к взвешенному сопровождается по аналогии с кипящим слоем переходом от однородного псевдооживления к неоднородному. Одновременно с взвешиванием дисперсной среды в ней, у нижней границы слоя, развивается процесс образования газовых пузырей, нарушающих ее сплошность и вызывающих при своем движении к свободной поверхности перемешивание частиц. Возникающая при этом псевдотурбулентная микроциркуляция материала (в отличие от устойчивой макроциркуляции в подвижном режиме) существенно интенсифицирует перенос теплоты от греющей поверхности к ядру слоя.

Кондуктивные виброаппараты, особенно предназначенные для высокотемпературных процессов с получением продукта в твердой фазе, обычно имеют небольшое сечение (характерный размер не превышает 0,5 м). Газовые пузыри чаще всего прорываются к поверхности в центральной части слоя, что вызывает преимущественно опускное движение частиц у обогреваемых стенок аппарата. В результате сложного движения материала, включающего микро- и макроперемещения твердой фазы, коэффициенты теплоотдачи от стенок и трубчатых греющих поверхностей достигают уровня 1000 Вт/(м²·К), и более. Коэффициенты теплоотдачи к днищу существенно ниже: их значения колеблются около уровня 500 Вт/(м²·К). Это объясняется как наличием изменяющегося во времени подслового газового зазора, так и образованием у днища газовых пузырей, которые в некоторых случаях могут практически блокировать греющую поверхность. Резонансное усиление колебаний виброслоя касается и амплитудных характеристик пульсаций порозности, которые при взвешивании в режиме, представленном на рис. 2а, возрастают на 45 % и способствуют усилению пульсационного переноса теплоты.

Оба действующих фактора — перемешивание слоя пузырьками и усиление пульсаций порозности — лежат в основе интенсификации переноса теплоты в кондуктивных аппаратах при резонансных колебаниях слоя мелкодисперсных частиц.

Резонанс мелкодисперсного слоя проявляет себя в первую очередь как резонанс давления газа, которое нарастает с увеличением амплитуды вибрационного воздействия. Однако темп роста давления совершенно различен в докритической и посткритической областях. При взвешивании темп замедляется, так как значительная часть газа прорывается сквозь слой в виде макронеоднородностей — газовых пузырей, вызывая сброс давления, отчетливо наблюдаемый на осциллограммах [6]. Существенное (почти на порядок) увеличение энергозатрат на виброожижение оказывается малоэффективным и, более того, вредным с точки зрения кондуктивного переноса теплоты в слое (рис. 3б). На фоне слабого нарастания пульсаций давления (кривая 1) происходит некоторое уменьшение коэффициентов теплоотдачи (кривая 2) ко всем рассмотренным теплообменным поверхностям как связанным с корпусом аппарата, так и свободно перемещающимся в слое.

Насыщающийся характер зависимости коэффициентов теплоотдачи от мощности на виброожижение указывает на достижение слоем состояния «идеального» перемешивания, когда интенсивность теплоотдачи газодисперсной среды определяется в основном термическим сопротивлением прилегающего к стенке малоподвижного слоя газа средней толщиной $\delta \sim r_v/2$.

Элементарная модель кондуктивного теплообмена при условии отсутствия образования в слое у стенки какой-либо структурно-гидродинамической аномалии, например, газовой полости, существующей продолжительное время ($\tau \gg T$), как обычно, может быть представлена соотношением $\alpha = \lambda_r/\delta$. Оценка интенсивности теплоотдачи для использовавшегося в опытах дисперсного материала (электрокорунд $d_v = 72$ мкм) дает цифру $\alpha \approx 1500$ Вт/(м²·К), в то время как максимальные экспериментальные значения для калориметров, размещенных в вертикальной стенке, и плавающего калориметра составляли ~ 1200 Вт/(м²·К). Уменьшение интенсивности теплоотдачи с ростом уровня внешнего воздействия легко объяснимо ростом количества образующихся газовых пузырей, что увеличивает время контакта газовой фазы с поверхностью нагрева.

Таким образом, можно полагать, что виброожижение мелкодисперсных порошков в резонансных режимах является действенным средством интенсификации внешнего теплообмена.

При проведении технологических процессов в кондуктивных аппаратах немаловажным обстоятельством является распределение коэффициентов теплоотдачи по высоте слоя. Интенсивность теплообмена здесь связана с особенностями структуры слоя резонансных параметров.

При основной резонансной частоте колебания давления сплошной фазы происходят в форме стоячей волны (четвертьволновая мода). При этом у нижней границы слоя, прилежащей к днищу, наблюдается пучность, а у свободной верхней границы узел давления [5]. Распределение скорости газа обратно давлению.

Зондирование слоя емкостным датчиком показало, что слой резонансных параметров имеет разрыхленное ядро и относительно плотные границы (рис. 4а). Над верхней границей находится протяженная зона с низкой концентрацией твердой фазы. Существование этой зоны связано, во-первых, с перемещением верхней границы слоя, где скорость газа достигает максимальных значений, и имеет место захват частиц выходящими из слоя с частотой вибрации струями газа. Во-вторых, появление данной зоны является результатом выхода из слоя газовых пузырей и неизбежного выброса частиц в надслоевое пространство.

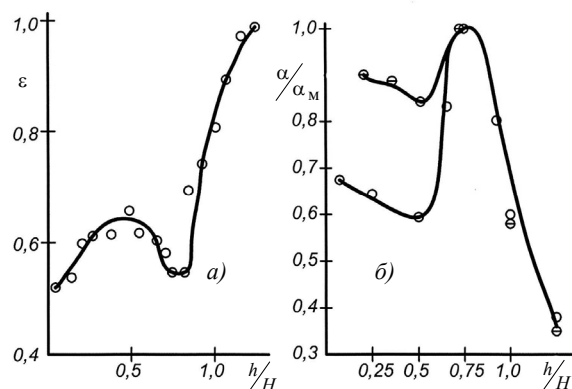


Рис. 4. Распределение порозности (а) и коэффициентов теплопередачи (б) по высоте слоя: $f = 20$ Гц; $A = 2,5$ мм; $H = H_p$; б — тип калориметра: \circ — цилиндрический горизонтальный; \ominus — вертикальный в стенке

Распределение коэффициентов теплоотдачи по высоте слоя, полученное с помощью калориметра, встроенного в стенку, и горизонтального перемещаемого цилиндрического калориметра показало, что интенсивность переноса теплоты от греющей поверхности к слою коррелирует с распределением плотности дисперсной среды (рис. 4б). В качественном отношении кривые на рис. 4а и 4б зеркально отражают друг друга и приводят к тривиальному выводу: при кондуктивном теплообмене коэффициенты теплоотдачи обратно пропорциональны порозности, и определяющая роль, таким образом, принадлежит твердой фазе. Наибольших значений коэффициенты теплоотдачи достигают у верхней границы слоя, где скорость перемещения газодисперсной среды выше.

Распределение коэффициентов теплоотдачи в ядре слоя $h \leq 0,5$ достаточно равномерное, поскольку разброс значений α не превышает 10 % от среднего значения на участке.

Сравнение результатов, полученных с использованием калориметров разных типов, делает необходимым экспериментальный анализ влияния на теп-

лообмен места размещения погруженных поверхностей нагрева. Как видно из рис. 4б, разброс максимальных и минимальных значений коэффициентов теплоотдачи от калориметра, не возмущающего слой, невелик и составляет около 20 %. Погруженный цилиндрический калориметр, имитирующий горизонтальную трубу, дает разность значений уже более 40 %.

Исследование влияния места размещения трубчатого калориметра в слое показало, что его поверхность является источником колебаний, когерентным с днищем. В опытах калориметр создавал собственный резонансный контур, управляемый по элементарным оценкам высотой слоя над излучающей поверхностью $H-h$ (глубиной погружения в слой): с увеличением расстояния от днища h резонансная частота контура возрастает (рис. 5). У границ слоя образование собственного контура невозможно, так как у нижней границы $H-h \approx H$, а у верхней — $H-h \rightarrow 0$. Неслучайно частоты, отвечающие максимумам, у закрытой и открытой границ близки к резонансной частоте слоя.

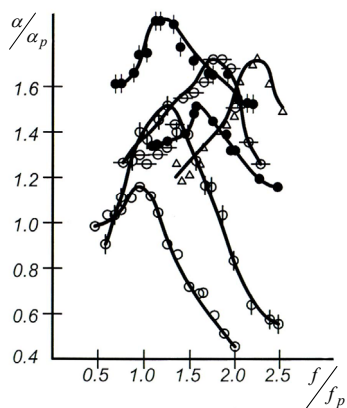


Рис. 5. Зависимости коэффициента теплоотдачи от частоты вибрации при разной глубине погружения калориметра: $H = 0,12\text{ м}$; $k = 4$; $(H-h)/H$: \circ — 0,88; \oplus — 0,08; \bullet — 0,63; \ominus — 0,38; \triangle — 0,23; \bullet — 0,13; $\alpha_p = \alpha_p|_{h=H}$

У нижней границы, в довершение всего, максимальные коэффициенты теплоотдачи практически совпадают с таковыми от донного калориметра: $\alpha \approx 500\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Отражение волн, генерируемых днищем, от цилиндрического калориметра, по-видимому, несущественно ввиду его малого диаметра (14 мм). В противном случае имело бы место образование резонансного контура с двумя закрытыми границами, частота которого, по расчетам, много выше наблюдаемой в эксперименте.

Приведенная оценка влияния погруженных горизонтальных труб, безусловно, носит качествен-

ный характер, так как генерируемые ими волны не являются плоскими.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A — амплитуда вибрации, мм;
- a — скорость звука в слое, м/с;
- d — диаметр частицы, мкм;
- f — частота колебаний, Гц;
- $k = A\omega^2/g$ — относительное ускорение вибрации;
- N — удельная мощность вибрации, Вт/кг;
- H — насыпная высота слоя, м;
- h — текущая высота слоя, м;
- p — давление газа, Па;
- δp — размах давления газа, Па;
- r — радиус частицы, мкм;
- T — период колебания, с;
- α — коэффициент теплоотдачи, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$);
- δ — толщина, м;
- ε — средняя за период порозность слоя;
- λ — коэффициент теплопроводности, Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$);
- τ — время, с;
- ω — угловая частота колебаний, рад/с.

Индексы:

- v — относится к началу взвешивания слоя;
- $г$ — относится к газу;
- $м$ — максимальный;
- $р$ — резонансный;
- $с$ — относится к частоте собственных колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **О применении** внешних периодических возмущений для интенсификации тепломассопереноса в псевдооживленном слое / А.П. Баскаков, А.Ф. Рыжков, А.С. Колпаков и др. // *Termodynamika warstwy fluidalnej*: Тр. 3-й Ogolnopolski sympozjon. Czestochowa, 1985. S. 17–22.
2. **А.с. № 1497459 СССР**. МКИ4 G01 N13/00. Способ определения частоты собственных колебаний материала / А.Ф. Рыжков, М.Г. Зайцев, А.С. Колпаков и др. // *Открытия. Изобретения*. 1989. № 28. с. 179.
3. **Оптимизация** процессов тепломассопереноса в монодисперсном и разноразмерном виброкипящих слоях / А.Ф. Рыжков, А.П. Баскаков, А.С. Колпаков и др. // *Тепломассоперенос в дисперсных системах*: Тр. 6-й Всес. конф. Минск: ИТМО, 1980. Т. 6. Ч. 1. С. 104–108.
4. **Экспериментальное** исследование упругих колебаний и диссипации энергии в газодисперсных средах. / А.С. Колпаков, Б.А. Путрик, А.К. Баракаян и др. // *Актуальные проблемы атомной науки и техники*: Сб. науч. тр. Свердловск, 1985. С. 30–31.
5. **Развитие** вынужденных колебаний в концентрированных мелкодисперсных системах / Е.Ф. Карпов, А.С. Колпаков, Б.А. Путрик и др. // *Физико-химическая гидромеханика*: Сб. науч. тр. Свердловск: УрГУ, 1985. С. 97–106.
6. **Колпаков А.С., Дружинина Ю.В.** Экспериментальный анализ взвешивания концентрированной мелкодисперсной среды при вибрационном воздействии. // *Вестник УГТУ-УПИ*. 2005. № 4 (56). С. 36–42.