

На правах рукописи

**ГОРБУНОВА Анастасия Михайловна**

**ВНЕШНИЙ МАССООБМЕН  
В ВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ ИНЕРТНОГО МАТЕРИАЛА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика и теплотехника» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Сапожников Борис Георгиевич**

Официальные оппоненты: **Гаряев Андрей Борисович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», заведующий кафедрой тепломассообменных процессов и установок;

**Рябов Георгий Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт», заведующий лабораторией специальных котлов отделения парогенераторов и топочных устройств

Ведущая организация : ОАО «Свердловский научно-исследовательский институт химического машиностроения», г. Екатеринбург

Защита состоится 1 апреля 2016 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Константин Эрленович Аронсон

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Для интенсификации технологических процессов «газ – твердое тело», сопровождающихся тепломассообменом, широко применяются дисперсные системы с активными гидродинамическими режимами – псевдооживленный и виброкипящий слои.

В виброкипящем слое, как и в псевдооживленном, можно выделить внешний тепло- и массообмен (между слоем и стенкой), внутренний (межфазный) – между частицами и средой и эффективную теплопроводность или диффузию слоя. Если вопросам всех видов теплообмена посвящена обширная литература, то по массообмену ее явно недостаточно, если не считать работы по кинетике сушки дисперсных материалов в аэровиброкипящем слое. Весьма ограничена литература по межфазному массообмену (между частицами и продуваемым газом) в виброкипящем слое, эффективным коэффициентам диффузии (перемешиванию), а по внешнему массообмену – практически отсутствует.

Вместе с тем сведения о внешнем массообмене (массоотдаче) необходимы, с одной стороны, для расширения физических представлений о таком сложном процессе, как внешний массообмен в виброкипящем слое, с другой – для расчета многих технологических процессов, протекающих при граничных условиях массообмена 3-го рода: испарения с пористой поверхности в первом периоде сушки, процессов адсорбции и десорбции, сублимации и десублимации в парогазовую среду, при поверхностной обработке металлических изделий и других.

Учитывая обширность темы настоящего исследования, основное внимание было обращено на процессы внешнего массообмена тел небольших размеров (шары со средним диаметром 14 и 24 мм, цилиндры  $\varnothing$  14 мм и длиной 20÷30 мм). При этом, как и в случае теплообмена, возникают дополнительные особенности для свободно плавающих тел и занимающих фиксированное положение в слое. Кроме того, необходимо учитывать неравномерность протекающих процессов массообмена по высоте слоя.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы было исследование внешнего массообмена (массоотдачи) в виброкипящем слое инертного материала для получе-

ния экспериментальных данных для тел небольших размеров как свободно плавающих, так и занимающих фиксированное положение, а также оценка неравномерности интенсивности массообмена по высоте слоя.

В ходе выполнения темы были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать массоотдачу тел небольших размеров (шары со средним диаметром 14 и 24 мм, цилиндры  $\varnothing$  14 мм и длиной 20÷30 мм) при свободной загрузке их в виброкипящем слое в зависимости от параметров вибрации, высоты слоя и его температуры, диаметра частиц, формы и размера размещенных тел.

2. Исследовать массоотдачу тел небольших размеров (шары со средним диаметром 14 и 24 мм) при их фиксированном размещении в виброкипящем слое в зависимости от параметров вибрации, высоты слоя, диаметра частиц и их плотности, размера размещенных тел. Обобщить полученные результаты в виде эмпирического уравнения подобия.

3. Исследовать локальные коэффициенты массоотдачи по высоте виброкипящего слоя в зависимости от параметров вибрации и размера частиц.

4. Выполнить сравнительный анализ с аналогичными экспериментальными данными по внешнему массообмену в псевдооживленном слое и по внешнему теплообмену в виброкипящем слое.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой исследования являются работы ведущих отечественных и зарубежных ученых, посвященные внешнему массообмену в псевдооживленном и тепломассообмену в виброкипящем слоях. Для решения поставленных задач использовались: стационарный экспериментальный метод, основанный на уравнении массоотдачи, аналоге уравнения Ньютона-Рихмана, с использованием в качестве модельного процесс сублимации тел, выполненных из нафталина, а для количественной характеристики – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций диффундирующего вещества; метод анализа размерностей в сочетании с методом многомерного линейного регрессионного анализа для обобщения полученных результатов и их сравнительный анализ с литературными данными по массообмену в псевдооживленном и теплообмену в виброкипящем слоях.

**Научная новизна.** Используя в качестве модельного процесс сублимации тел, выполненных из нафталина, а для количественной характеристики процесса коэффициент массоотдачи, получены новые экспериментальные данные о влиянии на внешний массообмен в виброкипящем слое для свободно плавающих тел и занимающих фиксированное положение амплитуды и частоты вибрации, среднего диаметра частиц дисперсного материала, его физических свойств, размеров испытуемых тел и высоты слоя. Установлено, что с ростом амплитуды вибрации, как для свободно плавающих тел, так и занимающих фиксированное положение, коэффициенты массоотдачи монотонно возрастают. Получено, что в условиях проведенных экспериментов для тел, занимающих фиксированное положение в слое, коэффициенты  $\beta$  практически линейно увеличивались с ростом относительного ускорения вибрации. Обнаружен сложный немонотонный характер изменения коэффициентов массоотдачи с ростом диаметра частиц, конкретный вид которого зависел от размеров испытуемых тел, как свободно плавающих, так и занимающих фиксированное положение, и высоты слоя. Опытные данные по коэффициентам массоотдачи для тел, занимающих фиксированное положение в слое, обобщены в виде степенной функции – эмпирического уравнения подобия.

Получены экспериментальные данные по локальным коэффициентам массоотдачи по высоте образца в виде вертикального цилиндра, размещенного в центре аппарата, в зависимости от амплитуды вибрации и диаметра частиц. Установлена существенная неравномерность коэффициентов  $\beta_h$  по высоте слоя, возрастающая с увеличением амплитуды вибрации, а также аномально высокие их значения в верхней части слоя, связанные с повышенной активностью движения в ней дисперсной среды. Выполнено сравнение с аналогичными экспериментальными данными по внешнему массообмену в псевдооживленном и по внешнему теплообмену в виброкипящем слое. Установлено, что аналогия между процессами массо- и теплообмена в виброкипящем слое неполная, что обусловлено, прежде всего, применением материалов, инертных по отношению к парам нафталина, и существенным влиянием дополнительного механизма, обусловленного относительным движением частиц и их групп для средне- и крупнозернистых материалов в непрерывной среде.

**Достоверность и обоснованность результатов** подтверждается применением апробированных методов экспериментального исследования, удовлетворительной воспроизводимостью результатов опытов, непротиворечивостью с современными представлениями о процессах тепло- и массообмена в дисперсных системах с активными гидродинамическими режимами, хорошим качественным согласованием с литературными данными по теплообмену в виброкипящем и массообмену в псевдооживленном слоях.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В научном отношении полученные результаты являются дополнительным вкладом в формирование физических представлений о внешнем массообмене в дисперсных системах с активными гидродинамическими режимами, в частности, в виброкипящем слое.

В прикладном отношении полученные экспериментальные данные по коэффициентам массоотдачи создают основу для разработки инженерных методик расчетов технологических процессов, сопровождающихся массоотдачей на границе твердое тело – газ: испарение с пористой поверхности в первом периоде сушки, адсорбция и десорбция, сублимация и десублимация в парогазовую среду, поверхностная обработка металлических изделий и другие процессы, протекающие при граничных условиях массообмена 3-го рода.

**Автор защищает:**

- результаты экспериментальных исследований коэффициентов массоотдачи от тел небольших размеров (шары со средним диаметром 14 и 24 мм, цилиндры  $\varnothing$  14 мм и длиной 20÷30 мм), свободно плавающих в виброкипящем слое, в зависимости от параметров вибрации, размера тела, его формы, высоты слоя, диаметра частиц; сравнительный анализ с аналогичными данными по теплообмену в виброкипящем слое и по массообмену в псевдооживленном;

- результаты экспериментальных исследований коэффициентов массоотдачи от тел небольших размеров (шары со средним диаметром 14 и 24 мм), занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое, в зависимости от параметров вибрации, размера тела и высоты слоя, диаметра частиц и их плотности; сравнитель-

ный анализ с аналогичными данными по теплообмену в виброкипящем слое и по массообмену в псевдооживленном; обобщение экспериментальных данных;

- результаты экспериментальных исследований локальных коэффициентов массоотдачи по высоте образца в виде вертикального цилиндра, размещенного в центре аппарата, в зависимости от амплитуды вибрации и размеров частиц слоя; сравнительный анализ с аналогичными данными по теплообмену в виброкипящем слое и по массообмену в псевдооживленном.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач и выборе методики исследования, разработке экспериментальной установки и проведении экспериментов, обработке, анализе и обобщении полученных опытных данных, сравнении с аналогичными результатами других исследователей, выработке рекомендаций по использованию полученных результатов.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IX научно-практической конференции «Дни науки – 2011. Ядерно-промышленный комплекс Урала» (Озерск, 2011); XVI Международной научно-практической конференции (Тамбов, 2011); IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии – Сушка и термовлажностная обработка материалов» (Москва, 2011); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Атомная энергетика (Екатеринбург, 2011); X и XI Международных научно-практических конференциях (ПДЭ-10 и ПДЭ-11) в рамках выставки «Энергетика и электротехника – 2011 и 2012» (Екатеринбург, 2011, 2012); Всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2011, 2012); Восемнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2012); 13 Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов (Магнитогорск, 2012); Международной научной конференции «Ресурсосбережение в химиче-

ской технологии» (Санкт-Петербург, 2012); XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий (Миасс, 2012); XIV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2012); Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2012 и НТИ-2013), Новосибирск, 2012, 2013; XIX Школе-семинаре молодых ученых под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Орехово-Зуево, 2013); I-ой международной научно-технической интернет конференции «Лесной комплекс в XXI веке» (Казань, 2013); Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014).

По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, из них 4 в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, условных обозначений, списка используемой литературы из 137 наименований на 140 страницах и приложений на 71 странице. Текст диссертации иллюстрируют 49 рисунков и 9 таблиц в основной части и 15 рисунков и 26 таблиц в приложении.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы использования виброкипящего слоя для осуществления различных технологических процессов, связанных с массообменом, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна, выносимые на защиту положения, теоретическая и практическая значимость работы, ее достоверность и апробация результатов исследования.

**В первой главе** приведен аналитический обзор литературных источников, посвященных внешнему массообмену в подвижных дисперсных системах – псевдооживленном слое (ввиду отсутствия таковых в виброкипящем слое), и краткий анализ внешнего теплообмена в виброкипящем слое.

Констатируется, что для экспериментального исследования коэффициента массоотдачи от поверхности раздела к подвижной дисперсной системе, в частности, псевдооживленному слою, применяются в основном два метода: испарение с поверхности пористого тела различных жидкостей и сублимация тела, выполненного из



нафталина, в окружающую среду. Отмечается, что более простой и надежной является методика, основанная на сублимации тел, выполненных из нафталина.

В исследованиях, как правило, применялись слои из материалов, инертных по отношению к парам нафталина (влиянием адсорбции также пренебрегали), а для описания массообмена использовались различные модификации, основанные на известном уравнении Ньютона-Рихмана для теплообмена. Полученные данные свидетельствуют об увеличении коэффициентов массоотдачи с ростом скорости фильтрации и размера частиц слоя. Результаты экспериментальных данных обобщались эмпирическими уравнениями вида

$$Sh = C \cdot Re^m \cdot Sc^n. \quad (1)$$

Отмечается отсутствие полной аналогии между процессами массо- и теплоотдачи в псевдооживленном слое, главной причиной которого является инертность частиц материала к парам нафталина. В некоторых работах приводятся экспериментальные данные по массоотдаче для тел, свободно плавающих в псевдооживленном слое, причем интенсивность массоотдачи для них была на 20÷50% ниже, чем для фиксированных, а также об изменении коэффициентов массоотдачи по высоте слоя.

**Во второй главе** приводятся результаты экспериментального исследования внешнего массообмена тел при свободной загрузке их в виброкипящий слой. В качестве модельного использовался процесс сублимации (испарения) испытуемых тел, выполненных из нафталина.

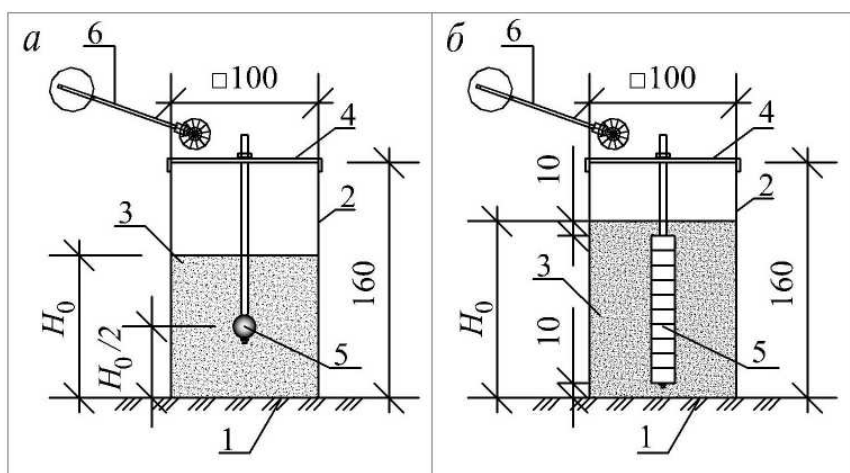


Рисунок 1 – Схемы экспериментальных установок: *a* – для исследования массоотдачи от тел при свободной загрузке в слой и занимающих фиксированное положение в слое; *б* – для исследования локальных коэффициентов массоотдачи по высоте виброкипящего слоя

Исследования проводились на установке (Рисунок 1 *a*),

основным элементом которой являлась камера квадратного поперечного сечения 2, выполненная из оргстекла, размерами 100×100 мм и высотой 140 мм, в которую засыпался дисперсный материал 3 – корунд узких фракции с размером частиц  $d_T =$

0,12, 0,25, 0,4, 0,63 и 1,25 мм или стеклянные шарики  $d_T = 0,675$  мм высотой  $H_0 = 60$  и 120 мм. Камера жестко крепилась к столу вибростенда 1 (использовался электродинамический стенд ST-700), создававший синусоидальные вертикально направленные колебания с частотой  $f = 35 \div 55$  Гц и амплитудой  $A = 0,3 \div 2,0$  мм; при этом относительное ускорение вибрации  $K$  не превышало 15. Исследования проводились в изотермических условиях. Для поддержания необходимой температуры в слое служил нагреватель б в виде лампы накаливания. Для снижения тепловых потерь через стенки и дно камеры последние были покрыты изоляцией.

В исследованиях со свободно плавающими телами частота вибрации составляла 40 Гц, модельными телами служили шары диаметром  $D_{III} = 14$  и 24 мм или цилиндры диаметром  $12 \div 13,5$  мм и длиной  $20 \div 30$  мм, изготовленные из нафталина. Температура в слое во всех исследованиях поддерживалась с помощью нагревателя в пределах  $t_{СЛ} = 60 \pm 1^\circ\text{C}$ . Искомый коэффициент массоотдачи рассчитывался по уравнению

$$\beta = \frac{\Delta M \cdot R_{III} T_{СЛ}}{F \tau (P_{III,C} - P_{III,0})}, \text{ кг/ч}, \quad (2)$$

где  $\Delta M$  – изменение массы испытуемого тела за время  $\tau$ , кг;  $R_{III} = 8314/\mu_{III}$  – газовая постоянная паров нафталина, Дж/(кг·К),  $\mu_{III} = 128,17$  кг/кмоль – молекулярная масса паров нафталина;  $T_{СЛ}$  – температура слоя, К;  $F$  – поверхность тела, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время, ч;  $P_{III,C}$ ,  $P_{III,0}$  – парциальные давления паров нафталина на поверхности тела и вдали от нее, Па. Последнее вследствие интенсивной самовентиляции в виброкипящем слое принималось равное нулю. Изменение массы образцов оценивалось путем взвешивания их на аналитических весах до и после опыта с погрешностью  $\pm 0,5$  мг.

Во всех исследованиях среднеквадратичная погрешность определения коэффициентов массоотдачи  $\beta$  не превышала 8%. Кроме того, специальные предварительные опыты показали, что в интервале  $t_{СЛ} = 35 \div 60^\circ\text{C}$  изменение коэффициентов  $\beta$  лежало в этих же пределах. Для оценки истирания (абразивного износа) в виброкипящем слое были проведены специальные опыты с нафталиновыми шарами при температурах  $t_{СЛ} = 21 \div 31^\circ\text{C}$ . Сравнение показало, что истираемость образцов из нафталина при  $t_{СЛ} = 60^\circ\text{C}$  не превышает 4-5%. Косвенно это подтверждают и опыты с

шарами из мела, который согласно методу Мооса по твердости, как и нафталин, относится в условных единицах к номеру 2.

### Влияние амплитуды вибрации, формы и размеров тел.

Получено (Рисунок 2), что во всех случаях независимо от размеров тела, его формы, диаметра частиц и высоты слоя с увеличением амплитуды вибрации в исследованном интервале коэффициенты  $\beta$  монотонно возрастают, достигая величин порядка 110 м/ч. Это связано с изменением состояния виброкипящего слоя – от подвижного (циркулирующего) к взвешенному и фонтанирующему (для мелкодисперсного материала). При этом одновременно повышается интенсивность пульсаций давления газовой среды, а вместе с ними и скорость неустановившейся фильтрации газовых потоков, существенных в слоях с размером частиц  $d_T \leq 1,0$  мм, а также циркуляции частиц и их групп, способствующих интенсификации всех процессов переноса, (например, теплоотдачи, кривые 4, 5), в том числе и массообмена, что свидетельствует об их аналогии. Вместе с тем можно видеть, что кривые  $\alpha = f(A)$  имеют тенденцию к насыщению, что обычно связывают с увеличением порозности засыпки и, как следствие, термического сопротивления на границе «слой – плавающее тело», величина которого не отражается на интенсивности массообмена.

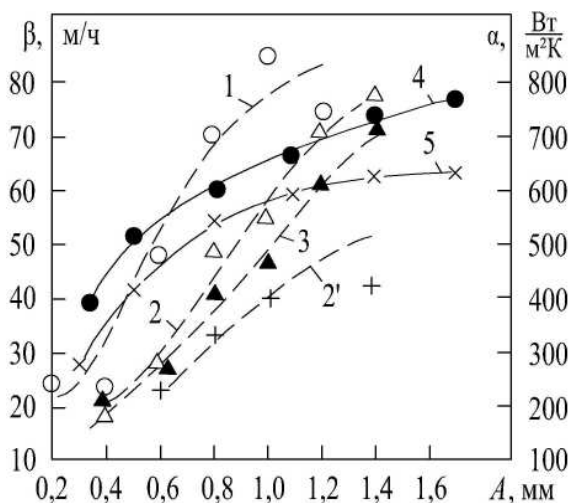
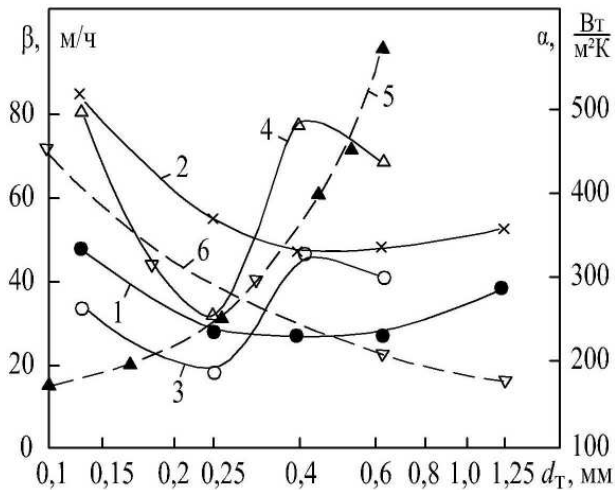


Рисунок 2 – Влияние амплитуды вибрации и формы тел на внешний массо- и теплообмен для свободно плавающих тел в виброкипящем слое корунда,  $f = 40$  Гц; для коэффициентов  $\beta$ ,  $D_{ш} = 14$  мм,  $H_0 = 60$  мм: 1 –  $d_T = 0,12$  мм; 2 – 0,25; 3 – 0,4; 2' – цилиндр,  $d_T = 0,25$  мм; для коэффициентов  $\alpha$  (Блинов А.В и др.), медный шар  $\phi 16$  мм,  $H_0 = 60$  мм: 4 –  $d_T = 0,07$  мм; 5 – 0,18 мм

Установлено также, что с увеличением среднего диаметра шара с 14 до 24 мм коэффициенты массоотдачи уменьшаются, поскольку последний, как более массивный, располагается преимущественно в нижней части слоя, отсюда и меньшая интенсивность массоотдачи. Аналогичный эффект наблюдается и для цилиндра (кривые 2 и 2'), который по массе занимает промежуточное положение между испытываемыми шарами.

**Влияние размеров частиц дисперсного материала и высоты слоя.** Данные, приведенные на рисунке 3 показывают, что с ростом размера частиц для шаров диаметром 14 мм (кривые 1, 2) наблюдается тенденция снижения коэффициентов  $\beta$  с небольшим увеличением их в слое частиц 1,25 мм, а для шаров большего размера ( $D_{III} = 24$  мм, кривые 3, 4) характер изменения коэффициентов  $\beta$  более сложный: с минимумом при  $d_T = 0,25$  мм и максимумом при  $d_T = 0,4$  мм.

Это связано с тем, что во внешнем массообмене в виброкипящем слое кроме конвекции газа, обусловленной осциллирующим изменением его скорости, большую роль играет относительное движение самих частиц и их групп, возникающее в слоях из средне- и крупнозернистых материалов, которые увлекают и переносят с собой свежие порции газовой среды, способствуя интенсивному массообмену, в том числе,



и вблизи поверхности тела.

Рисунок 3 – Влияние размера частиц на внешний массо- и теплообмен для свободно плавающих тел в виброкипящем слое корунда,  $f = 40$  Гц,  $H_0 = 60$  мм; для коэффициентов  $\beta$ : шар из нафталина,  $D_{III} = 14$  мм: 1 –  $A = 0,6$  мм; 2 –  $1,0$  мм;  $D_{III} = 24$  мм: 3 –  $A = 0,6$  мм; 4 –  $1,0$  мм; 5 – псевдооживленный слой, стеклянные шарики,  $W = 2$ ,  $D_{III} = 16$  мм (Prins и др.); для коэффициентов  $\alpha$  от нижнего основания медного диска  $\varnothing 40 \times 5$  мм: 6 –  $f = 40$  Гц,  $H_0 = 90$  мм, корунд (Блинов А.В. и др.).  $W$  – число псевдооживления

Для шаров диаметром 14 мм (Рисунок 3, кривые 1, 2; рисунок 7, кривые 1'-3') этот механизм несколько ослабляется в связи с перемещением самого тела и поэтому приводит лишь к некоторой компенсации снижения массоотдачи, обусловленной уменьшением пульсации газовой среды с ростом размера частиц. Для шаров диаметром 24 мм (Рисунок 3, кривые 3, 4; рисунок 8, кривые 5-7), как более массивных, а значит и инерционных, механизм, связанный с относительным пульсирующим движением частиц, становится значительным и поэтому после снижения коэффициенты массоотдачи достигают минимума, а затем возрастают. Но вместе с увеличением диаметра частиц их число в единице объема слоя и переносимая масса газа сокращаются, что в итоге приводит в дальнейшем после максимума к уменьшению коэффициентов  $\beta$ .

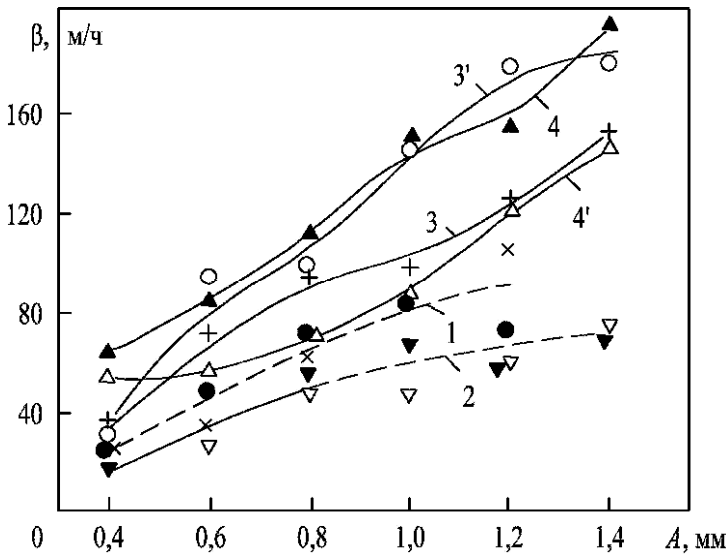
Установлено, что изменение высоты слоя от 60 до 120 мм по-разному влияет на массоотдачу для тел разного размера, что обусловлено в свою очередь изменением гидродинамической обстановкой в виброкипящем слое с увеличением его высоты, а также условиями обтекания более массивного тела.

Сравнение полученных данных с результатами других исследователей о влиянии диаметра частиц на коэффициенты массоотдачи показывает, что в псевдооживленном слое (рисунок 3, кривая 5) с увеличением размера частиц коэффициенты  $\beta$  монотонно возрастают, так как при  $W = \text{const}$  требуется бóльшая скорость фильтрации  $w_{\text{ф}}$  для псевдооживления засыпки из более крупных частиц, способствующая увеличению конвективной составляющей массоотдачи. В виброкипящем слое (кривые 1-4) напротив, чем больше размер частиц, тем меньше величина скорости газовых потоков и ее пульсаций, а это должно привести, как отмечалось выше, к снижению интенсивности массообмена, которое частично компенсируется механизмом, обусловленным относительным движением частиц в слоях из средне- и крупнозернистых материалов. Этот механизм ввиду малой теплоемкости газа не влияет на теплоотдачу (кривая б), отсюда и монотонное уменьшение коэффициентов  $\alpha$  с увеличением диаметра частиц. Следовательно, аналогия между массо- и теплообменом для свободно плавающих тел в виброкипящем слое не является полной.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментального исследования внешнего массообмена тел, занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое. Исследования проводились на установке (Рисунок 1 а) и по методике с использованием уравнения (2), описанных в главе 2, с той разницей, что модельные тела жестко крепились к аппарату с помощью державки и размещались в центре слоя. Частота вибрации изменялась в пределах  $f = 35 \div 55$  Гц.

**Влияние амплитуды и частоты вибрации.** И в этих опытах независимо от диаметра шара, высоты слоя и свойств материала, размера частиц слоя с увеличением амплитуды вибрации (Рисунок 4, кривые 3, 3', 4, 4') наблюдается тенденция возрастания коэффициентов массоотдачи. Как и в предыдущих исследованиях (глава 2), это объясняется аналогичным изменением величины пульсации скорости газовых потоков, в результате чего на мало интенсивный процесс диффузии накладывается

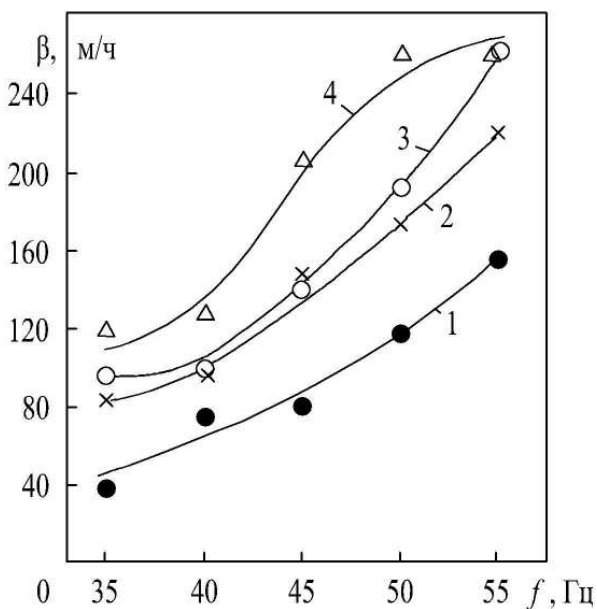
конвективный перенос массы. Кроме того, определенную положительную роль в процессе массообмена играют хаотическое движение самих частиц и их групп, турбулизирующих газовую среду вблизи вибрирующего тела и доставляющих к



поверхности свежие порции газа с малой концентрацией паров нафталина, а также само вибрирующее тело.

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента массоотдачи  $\beta$  от амплитуды вибрации  $A$  при  $f = 40$  Гц,  $H_0 = 60$  мм; плавающие тело: 1 –  $d_T = 0,12$  мм,  $\bullet D_{III} = 14$  мм;  $\times D_{III} = 24$  мм; 2 –  $d_T = 0,63$  мм,  $\nabla D_{III} = 14$  мм;  $\blacktriangledown D_{III} = 24$  мм; фиксированное:  $d_T = 0,12$  мм; 3 –  $+$   $D_{III} = 14$  мм; 3' –  $\circ D_{III} = 24$  мм;  $d_T = 0,63$  мм; 4 –  $\blacktriangle D_{III} = 14$  мм; 4' –  $\triangle D_{III} = 24$  мм

С увеличением частоты вибрации при прочих равных условиях для тел, занимающих фиксированное положение, наряду с монотонным возрастанием коэффициентов массоотдачи (Рисунок 5) наблюдался и более сложный характер изменения коэффициентов  $\beta$ , связанный с тем, что вибро-



кипающий слой является колебательной системой и как следствие возможны режимы, сопровождающиеся, в частности, влиянием второго резонанса.

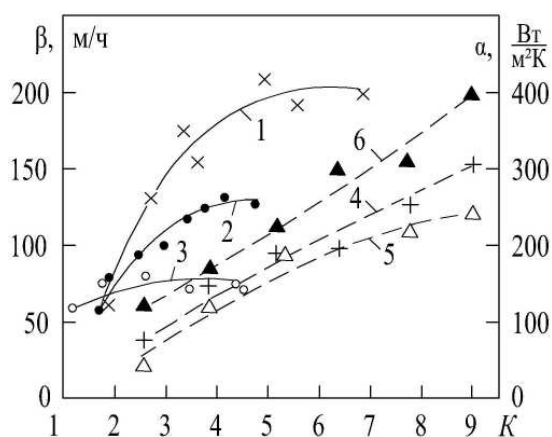
Рисунок 5 – Зависимость коэффициента массоотдачи  $\beta$  от частоты вибрации  $f$  при  $H_0 = 60$  мм,  $d_T = 0,12$  мм,  $D_{III} = 14$  мм, корунд: 1 –  $A = 0,6$  мм; 2 –  $0,8$  мм; 3 –  $1,0$  мм; 4 –  $1,2$  мм.

Однако в целом в условиях проведенных экспериментов коэффициенты  $\beta$  практически линейно увеличивались с ростом относительного ускорения вибрации  $K$  (Рисунок 6,

кривые 4-6), что позволяет считать  $K$  обобщающим параметром, учитывающим совместное влияние амплитуды и частоты вибрации.

**Получены данные о влиянии размеров тел, высоты слоя и свойств сыпучего материала.** В частности, установлено, что при  $H_0 = 60$  мм в слое частиц

$d_T = 0,12$  мм (Рисунок 4) для тела бóльшего размера коэффициенты массоотдачи выше (кривая 3' располагается над кривой 3); в слое частиц 0,25 мм для обоих тел коэффициенты  $\beta$  практически выравниваются, а в слое крупных – картина обратная: коэффициенты массоотдачи больше для тела меньшего размера (кривые 4 и 4'). В слое высотой 120 мм для всех частиц слоя интенсивность массоотдачи была выше для тел меньшего размера. Для объяснения полученных результатов наряду с рассмотренными ранее механизмами переноса, действующими в виброкипящем слое, учитывались особенности обтекания фиксированных тел виброкипящим слоем, приводящие к образованию менее плотной пограничной зоны, величина и форма



которой зависели от параметров вибрации, размера частиц слоя и самого тела.

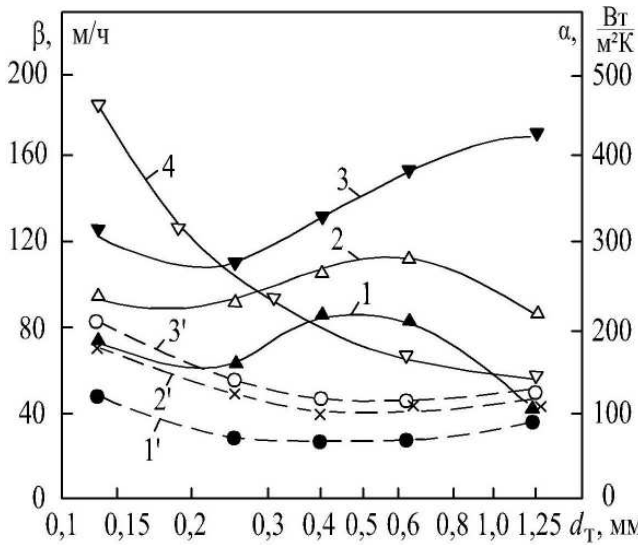
Рисунок 6 – Влияние относительного ускорения вибрации  $K$  на внешний тепло- и массообмен для тел, занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое корунда; для коэффициентов  $\alpha$ :  $H_0 = 50$  мм,  $D_{III} = 15$  мм; 1 –  $d_T = 0,11$  мм,  $f = 41 \div 61$  Гц; 2 –  $d_T = 0,16$  мм,  $f = 41$  Гц; 3 –  $d_T = 0,63$  мм,  $f = 41 \div 61$  Гц; для коэффициентов  $\beta$ : шар из нафталина,  $f = 40$  Гц,  $t_{СЛ} = 60$  °С,  $H_0 = 60$  мм,  $D_{III} = 14$  мм: 4 –  $d_T = 0,12$  мм; 5 –  $d_T = 0,25$  мм; 6 –  $d_T = 0,63$  мм

В опытах с корундом ( $\rho_T = 3900$  кг/м<sup>3</sup>) и стеклянными шариками ( $\rho_T = 2700$  кг/м<sup>3</sup>) переход к слою частиц меньшей плотности приводил к снижению коэффициентов  $\beta$ , поскольку в этом случае при прочих равных условиях одновременно уменьшается величина пульсаций скорости газовых потоков.

**Опытные данные о влиянии размера частиц** были представлены в полулогарифмических координатах в виде зависимости  $\beta = f(d_T)$  при условии  $A = \text{const}$  и  $f = \text{var}$  (например, Рисунок 7, кривые 1-3), а также при  $f = \text{const}$  и  $A = \text{var}$ . Установлено, что в обоих случаях для модельных тел  $D_{III} = 14$  мм вначале наблюдается снижение коэффициентов массоотдачи с минимумом при  $d_T = 0,25$  мм, затем их увеличение с максимумом при  $d_T = 0,63$  мм и последующим уменьшением в слое частиц 1,25 мм.

Такой характер изменения коэффициента  $\beta$  можно объяснить, как и в случае с данными на рисунке 3 (кривые 3, 4), учетом дополнительного механизма, обусловленного относительным движением самих частиц и их групп, возникающим в слоях

из средне- и крупнозернистых материалов, которые увлекают и переносят с собой свежие порции газовой среды, способствуя интенсивному массообмену, в том числе,



и вблизи поверхности тела.

Рисунок 7 – Зависимость коэффициента массоотдачи  $\beta$  от размера частиц  $d_T$  при  $f = 40$  Гц,  $H_0 = 60$  мм,  $D_{ш} = 14$  мм; плавающее: 1' –  $A = 0,6$  мм; 2' –  $0,8$ ; 3' –  $1,0$ ; фиксированное: 1 –  $A = 0,6$  мм; 2 –  $0,8$ ; 3 –  $1,2$ ; коэффициент  $\alpha$ : 4 – медный шар  $\varnothing 26$  мм,  $H_0 = 50$  мм,  $K = 5,5$  (Лайковская Е.Ю)

В слое мелкодисперсного материала ( $d_T = 0,12$  мм) скорость относительного движения мала, поэтому коэффициенты массоотдачи уменьшаются из-за общего снижения конвективных потоков газа и частиц. В дальнейшем с ростом  $d_T$  в слое среднезернистых материалов ( $0,25$  и  $0,4$  мм) относительное движение частиц и их групп возрастает, поэтому доля переноса массы газа частицами увеличивается, что не только компенсирует снижение коэффициентов  $\beta$  вследствие уменьшения скорости конвективных потоков, но и приводит к некоторому увеличению коэффициентов  $\beta$ . Но одновременно сокращается число частиц в единице объема, что в итоге приводит

к снижению массы газа, увлекаемой частицами, поскольку интенсивность относительного движения достигает предела и в дальнейшем не изменяется. Поэтому после достижения максимума коэффициенты массоотдачи снижаются.

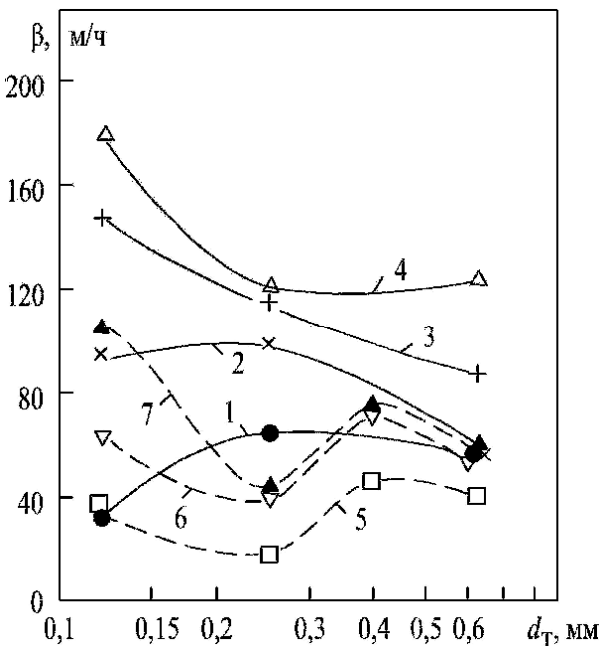


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента массоотдачи  $\beta$  от размера частиц  $d_T$  при  $f = 40$  Гц,  $H_0 = 60$  мм,  $D_{ш} = 24$  мм; фиксированное: 1 –  $A = 0,4$  мм; 2 –  $A = 0,6$  мм; 3 –  $1,0$ ; 4 –  $1,2$ ; плавающее: 5 –  $A = 0,6$  мм; 6 –  $0,8$ ; 7 –  $1,2$ .

При размещении в слое шара большего диаметра (Рисунок 8, кривые 1-4) отмеченные выше особенности зависимости  $\beta = f(d_T)$  для фиксированных тел, например наличие максимума, выражено слабее и проявляется лишь при  $A \leq 0,6$  мм, а при бóльших



амплитудах наблюдается монотонное уменьшение коэффициентов  $\beta$ , но не такое резкое из-за влияния механизма переноса, обусловленного относительным движением частиц и их групп. При этом дополнительное влияние оказывает размер и форма разреженной зоны около фиксированного вибрирующего тела.

**Сопоставление полученных результатов с данными по внешнему массообмену для свободно плавающих тел (глава 2)** показывает, что с ростом амплитуды вибрации (Рисунок 4) в обоих случаях коэффициенты массоотдачи монотонно увеличиваются, но интенсивность массообмена выше для фиксированных тел, так как вокруг них, вибрирующих с частотой и амплитудой вынужденных колебаний, образуется пограничная зона с интенсивным движением газовых потоков, обеспечивающих более высокие коэффициенты массоотдачи. Последнее обстоятельство приводит к существенному отличию характера изменения коэффициентов массоотдачи от диаметра частиц (Рисунки 7 и 8). Вместе с тем сравнение полученных результатов с аналогичными данными по теплообмену (Рисунок 6, кривые 1-3 и рисунок 7, кривая 4) свидетельствует о неполной аналогии с теплообменом в виброкипящем слое.

Для обобщения полученных результатов был принят метод анализа размерностей. Анализ экспериментальных данных позволил представить искомый коэффициент массоотдачи в виде функции:

$$\beta = f(A, \omega, g, d_T, H_0, D_{Ш}, \nu, \rho_T, D, P_{ПНС}, P_{ат}), \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая частота вибрации;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха;  $D$  – коэффициент бинарной диффузии “нафталин-воздух”;  $P_{ПНС}$  – парциальное давление паров нафталина на поверхности раздела;  $P_{ат}$  – атмосферное давление, из которой после соответствующих преобразований было получено уравнение подобия:

$$Sh = f\left(\frac{A}{D_{Ш}}, K, Re_D, \frac{d_T}{D_{Ш}}, \frac{H_0}{D_{Ш}}, Sc, \frac{P_{ПНС}}{P_{ат}}, \frac{\Delta P_{ПНС}}{\rho_T (A\omega)^2}\right). \quad (4)$$

С учетом конкретных условий проведения исследований опытные данные были окончательно обобщены в виде следующей степенной функции:

$$\text{Sh} = 12,9 \cdot K^{0,64} \text{Pe}_D^{0,17} \left( \frac{A}{D_{\text{III}}} \right)^{0,079} \left( \frac{H_0}{D_{\text{III}}} \right)^{0,16}, \quad (5)$$

справедливой в интервалах определяющих чисел подобия равных:  $K = A\omega^2/g = 2,57 \div 14,59$ ,  $\text{Pe}_D = A\omega d_T/D = 2,18 \div 168,15$ ,  $A/D_{\text{III}} = 0,0184 \div 0,1053$ ,  $H_0/D_{\text{III}} = 2,5 \div 8,6$ .

Среднеквадратичная погрешность составила 21%, что вполне допустимо для такой сложной дисперсной системы, как виброкипящий слой.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментального исследования локальных коэффициентов массоотдачи по высоте виброкипящего слоя. В качестве модельного использовался процесс сублимации от вертикального цилиндрического образца, набранного из 10-ти одинаковых нафталиновых таблеток с исходным средним диаметром 14 мм и высотой 10 мм каждая (общей длиной 100 мм), нанизанных на стержень, с помощью которого образец жестко крепился в центре слоя. Для устранения массообмена с торцов нижняя и верхняя таблетки изолировались шайбами. Опыты проводились (Рисунок 1 б) в вертикальной камере квадратного сечения 100×100 мм высотой 140 мм при частоте  $f = 40$  Гц и амплитудах  $A = 0,4 \div 1,4$  мм. Сыпучим материалом служил электрокорунд узких фракций с размером частиц  $d_T = 0,12, 0,25$  и  $0,63$  мм, инертный по отношению к парам нафталина. Высота слоя составляла  $H_0 = 120$  мм. Коэффициент массоотдачи  $\beta_h$  каждой таблетки рассчитывался по уравнению (2), в котором под величиной  $\Delta M$  принималось изменение массы каждой таблетки  $\Delta M_i$  в течение конкретного опыта  $\tau$ . Остальные величины полностью соответствуют описанию уравнения (2).

Прежде всего (Рисунок 9, кривые 1-3), установлена существенная неравномерность коэффициентов  $\beta_h$  по высоте слоя, возрастающая с увеличением амплитуды вибрации. Другой общей особенностью характера распределения интенсивности массообмена является сравнительно высокие коэффициенты  $\beta_h$  в верхней части слоя (при  $h \approx 105$  мм, рисунки 9-11). Наблюдается и некоторое повышение коэффициентов  $\beta_h$  в нижней части. Такой вид кривых  $\beta_h(h)$  связан с тем, что в нижней, примыкающей к дну аппарата, и в верхней части наблюдаются зоны с более активным движением дисперсной среды и связанного с ним внешнего тепло- и массообмена.

Материал, находящийся в средней части, стеснен слоями у верхней и нижней границ, поэтому подвижность частиц в ядре слоя меньше.

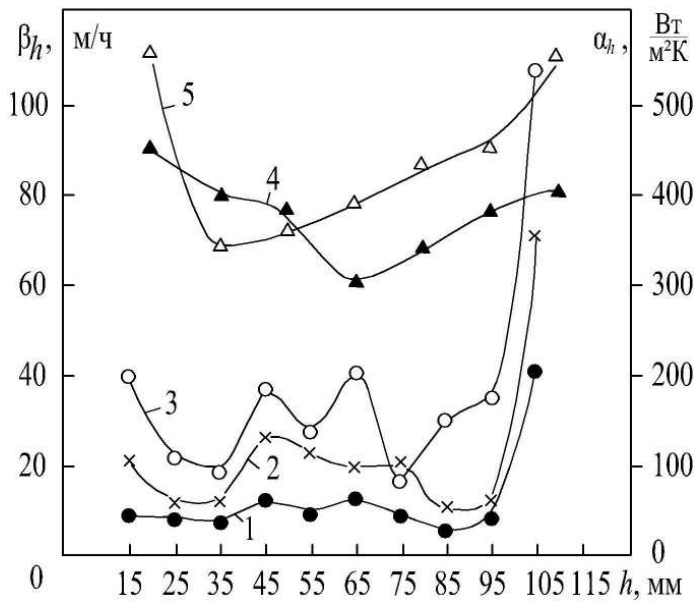
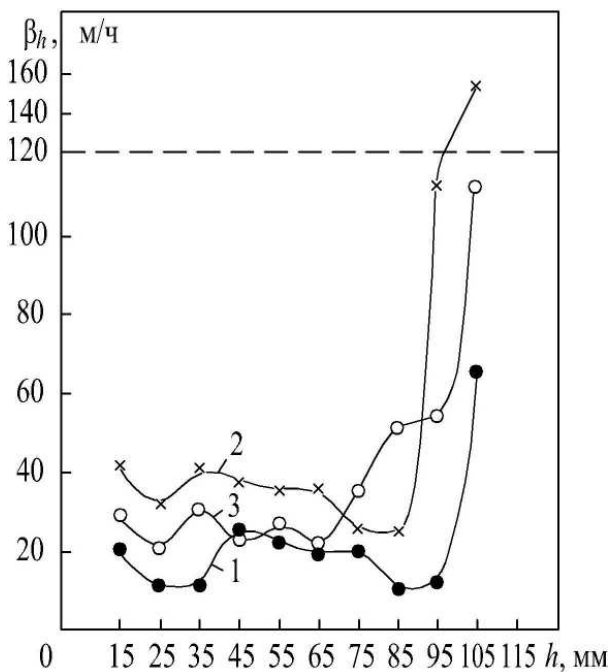


Рисунок 9 – Влияние амплитуды вибрации на зависимость коэффициентов массоотдачи  $\beta_h$  и теплоотдачи  $\alpha_h$  по высоте слоя  $h$  корунда при  $H_0 = 120$  мм; для массообмена, вертикальный образец  $\phi 14$  мм,  $d_T = 0,12$  мм,  $f = 40$  Гц;: 1 –  $A = 0,6$  мм,  $K = 3,86$ ; 2 –  $1,0$ ,  $6,43$ ; 3 –  $1,4$ ,  $9,01$ ; для теплообмена (Гапонцев В.Л.), вертикальный калориметр  $\phi 25$  мм,  $d_T = 0,07$  мм,  $f = 21,3$  Гц;: 4 –  $A = 1,5$  мм,  $K = 2,81$ ; 5 –  $2,0$ ,  $3,75$

В свою очередь, часть засыпки у нижней границы слоя периодически уплотняется вибрирующим дном камеры, в результате чего коэффициенты  $\beta_h$  и  $\alpha_h$  здесь меньше. В основной (средней) части слоя (Рисунки 9, 10; Рисунок 11, кривые 1, 2) наблюдаются вариации коэффициентов  $\beta_h$ , аналогичные таковым в псевдооживленном слое (Островская А.В.,



Королев В.Н.), размах которых увеличивается с ростом амплитуды.

Рисунок 10 – Влияние размера частиц на характер распределения коэффициента  $\beta_h$  по высоте слоя  $h$ ,  $A = 1,0$  мм,  $f = 40$  Гц,  $H_0 = 120$  мм: 1 –  $d_T = 0,12$  мм; 2 –  $d_T = 0,25$  мм; 3 –  $d_T = 0,63$  мм

Неравномерность распределения коэффициентов  $\beta_h$  в виде вариаций их значений в средней части слоя обусловлена аналогичным характером изменения пульсаций давления газа, его скорости и подвижности частиц, создающим очаги с более высокой или низкой интенсивностью переноса, что в особенности проявляется в процессах массообмена в слое инертного материала. Получено также, что с ростом амплитуды вибрации кривые 1-3 (Рисунок 9), характеризующие зависимости  $\beta_h = f(h)$ , располагаются соответственно выше, что свидетельствует, как и в предыдущих исследованиях, о

монотонном увеличении коэффициентов массоотдачи  $\beta_h$ . С ростом размера частиц (Рисунок 10), как и в опытах, приведенных в главе 3, наблюдается тенденция вначале увеличения локальных коэффициентов массоотдачи (кривая 2, соответствующая слою частиц  $d_T = 0,25$  мм, располагается выше кривой 1), а затем происходит некоторое снижение интенсивности массообмена (кривая 3, соответствующая слою частиц  $d_T = 0,63$  мм, располагается ниже кривой 2).

Сравнение полученных данных с аналогичными результатами в псевдооживленном слое показало, что имеются значительные количественные отличия на концевых участках. Причем в псевдооживленном слое высокие коэффициенты  $\beta_\ell$  получены на нижнем концевом участке, так как наиболее интенсивно обтекается нижняя (лобовая) часть образца, а на верхней части образуется шапка из малоподвижного материала. В виброкипящем слое верхняя часть находится в активной зоне, отсюда и более высокая интенсивность массообмена.

Сопоставление локального массо- и теплообмена по высоте виброкипящего слоя (например, рисунок 9) также свидетельствует о их неполной аналогии.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

1. Используя в качестве модельного процесс сублимации тел, выполненных из нафталина (шары, цилиндры, набор из таблеток в виде вертикального образца), получены новые экспериментальные данные по внешнему массообмену (массоотдаче) при свободном размещении их и занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое, и локальному массообмену по высоте слоя.

2. Установлено влияние параметров вибрации, высоты слоя и его температуры, диаметра частиц, формы и размера исследованных тел на опытные коэффициенты массоотдачи, которые для фиксированных тел обобщены уравнением подобия (5).

3. Обнаружена общая тенденция увеличения коэффициентов массоотдачи с ростом параметров вибрации, аналогичная для коэффициентов теплоотдачи в виброкипящем слое.

4. В отличие от данных по внешнему теплообмену, согласно которым с увеличением диаметра частиц слоя коэффициенты теплоотдачи монотонно уменьшаются, для внешнего массообмена зависимость более сложная, причем зависящая от разме-

ра модельного тела и условий проведения опытов: свободно плавающего или занимающего фиксированное положение в слое. Для объяснения полученных результатов кроме известных механизмов переноса в виброкипящем слое использовался дополнительный перенос массы газа, связанный с относительным движением частиц средне- и крупнозернистых материалов в непрерывной среде, а также особенности обтекания свободно плавающих и фиксированных тел в виброкипящем слое.

5. В исследованиях локальных коэффициентов массоотдачи для образца в виде вертикального цилиндра, размещенного в центре аппарата, установлена существенная неравномерность коэффициентов  $\beta_h$  по высоте слоя, возрастающая с увеличением амплитуды вибрации, а также аномально высокие их значения в верхней части слоя, связанные с высокой активностью движения в ней дисперсной среды; получены данные о влиянии амплитуды вибрации и размера частиц.

6. Выполнено сравнение с соответствующими экспериментальными данными других исследователей по внешнему массообмену в псевдооживленном и по теплообмену в виброкипящем слоях. Установлено, что аналогия между процессами массо- и теплообмена в виброкипящем слое не является полной.

7. Полученные данные по коэффициентам массоотдачи могут быть использованы при разработке инженерных методик расчета технологических процессов, сопровождающихся массоотдачей на границе твердое тело – газ, протекающие при граничных условиях массообмена 3-го рода, и в частности, для окислительной перекристаллизации отработавшего топлива АЭС при выборе оптимальных режимных параметров (частоты и амплитуды вибрации, высоты слоя) и конструктивных размеров горизонтального виброаппарата лоткового типа, что подтверждено справкой об использовании результатов ОАО «СвердНИИхиммаш».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

**Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Горбунова, А.М. (Сивкова, А.М.) Исследование внешнего массообмена (массоотдачи) от свободно плавающих тел в виброкипящем слое инертного материала / Горбунова, А.М. (Сивкова, А.М.), Б.Г. Сапожников // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012 – № 3-4. – С.149-151.

2. Горбунова, А.М. Экспериментальное исследование внешнего массообмена в слое дисперсного материала, подверженного вибрационному воздействию / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56. – № 4. – С. 116-118.

3. Горбунова, А.М. Внешний локальный массообмен в виброкипящем слое инертного материала / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 7. – С. 10-14.

4. Горбунова, А.М. Особенности внешнего тепло- и массообмена в виброаппаратах для регенерации отработавшего топлива АЭС / Б.Г. Сапожников, А.М. Горбунова, Ю.О. Зеленкова, Г.Б. Сапожников, Н.П. Ширяева // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 66-72.

#### **Прочие основные публикации и работы:**

5. Горбунова, А.М. (Сивкова, А.М.) Процессы тепломассообмена в аппаратах с виброкипящим слоем для регенерации отработавшего топлива АЭС / А.М. Горбунова (А.М. Сивкова), Б.Г. Сапожников // Дни науки – 2011. Ядерно-промышленный комплекс Урала: материалы IX научно-практической конференции. – Озерск: ОТИ НИЯУ МИФИ, ФГУП «ПО «Маяк», 2011. – Т. 2. – С. 53-55.

6. Горбунова, А.М. (Сивкова, А.М.) Внешний массообмен (массоотдача) в виброподвижном слое инертного сыпучего материала / Б.Г. Сапожников, А.М. Горбунова (А.М. Сивкова) // Современные энерго-сберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – Москва – 2011»: труды IV Международной научно-практической конференции. – М.: ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина (МГАУ), 2011. – Т. 1. – С. 256-260.

7. Горбунова, А.М. Внешний массообмен в аппаратах с виброкипящим слоем / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка кадров: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-тилетию кафедры «Атомная энергетика» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, 6-8 октября, 2011 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – Ч. 1. – С. 43-47.

8. Горбунова, А.М. Процессы массоотдачи в виброкипящем слое мелкозернистого материала / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы Восемнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (1-2 марта, 2012 г., Москва, МЭИ). – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – Т. 3. – С. 206.

9. Горбунова, А.М. Интенсификация процессов массоотдачи в аппаратах с использованием виброкипящего слоя / Б.Г. Сапожников, А.М. Горбунова // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – № 2. – С. – 11-13.

10. Горбунова, А.М. Исследование внешнего массообмена в технологических аппаратах с виброкипящим слоем / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов (г. Магнитогорск, 22-24 мая, 2012 г.); под общ. ред. Б.К. Сеничкина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2012. – С. 59-62.

11. Горбунова, А.М. Интенсификация процессов массообмена (массоотдачи) в аппаратах химической технологии с использованием виброкипящего слоя / А.М. Горбунова // Ресурсосбережение в химической технологии: сборник трудов международной конференции. – СПб.: ГТИ(ТУ), 2012. – С. 27-29.

12. Горбунова, А.М. Исследование движения газовой среды и внешнего массообмена в виброподвижном слое сыпучего материала / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников, Ю.О. Зеленкова, Г.Б. Сапожников, Н.П. Ширяева // XXXII Всероссийская конференция по проблемам науки и технологий: сборник материалов. – Миасс, 2012. – С. 122-125.

13. Горбунова, А.М. Внешний массообмен в виброкипящем слое и его сравнение с теплообменом / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2012. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 255-258.

14. Горбунова, А.М. Исследование внешнего локального массообмена в виброкипящем слое инертного дисперсного материала / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников

// Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Ч. 4. – С. 298-302.

15. Горбунова, А.М. Исследование процессов внешнего массообмена в виброкипящем слое / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. – № 1. – С. 35-37.

16. Горбунова, А. М. Внешний массообмен от свободно плавающих тел и занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое инертного материала / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: тезисы докладов XIX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (20-24 мая, 2013 г., г. Орехово-Зуево). – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 177-178.

17. Горбунова, А.М. Обобщение опытных данных по внешнему массообмену тел, занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое / А.М. Горбунова, Б.Г. Сапожников // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 10 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – Ч. 4. – С.327-331.

18. Горбунова А.М. Внешний тепло- и массообмен свободно плавающих тел и занимающих фиксированное положение в виброкипящем слое / Б.Г. Сапожников, А.М. Горбунова, Ю.О. Зеленкова, Г.Б. Сапожников, Н.П. Ширяева // Тезисы докладов Шестой Российской национальной конференции по теплообмену в 3 томах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – Т. 2. – С. 271-272.