

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента  
на диссертацию Горбуновой Анастасии Михайловны «Внешний  
массообмен в виброкипящем слое инертного материала»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 137 наименований на 140 страницах основного текста и приложений на 71 странице. Работа иллюстрирована 49 рисунками и 9 таблицами в основной части и 15 рисунками и 26 таблицами в приложении.

Работа посвящена важным проблемам внешнего теплообмена в виброкипящем слое и является существенным вкладом в развитие этого научного и практического направления использования одного из вариантов кипящего слоя для интенсификации ряда технологических процессов.

**Актуальность темы диссертации.** Виброкипящий слой, как и псевдооживленный, являются системами с интенсивным перемешиванием частиц наполнителя слоя, элементов погруженных в слой и газовой фазы, что позволяет использовать и тот и другой для интенсификации многих технологических процессов, сопровождающихся теплообменом. Если в псевдооживленном слое процессы тепло и массообмена существенно зависят от скорости псевдооживления, то в виброкипящем слое интенсивность и характер движения дисперсного материала обусловлены вибрационным воздействием. Учитывая, что в ряде случаев, характерных для технологий обработки материалов, подача целевого компонента в процессах массообмена определяется особенностями самого процесса, имеются некоторые преимущества виброкипящего слоя перед псевдооживленным. В отличие от кипящего слоя сведения о процессах массообмена твердое тело – газ в виброкипящем слое ограничены, а по внешнему массообмену практически отсутствуют. Поэтому актуальность темы работы не вызывает сомнения.

**В первой главе** диссертации дан подробный аналитический обзор литературных источников, посвященных внешнему массообмену в псевдооживленном и внешнему теплообмену в виброкипящем слоях. Эти вопросы обсуждаются применительно к свободно плавающим телам и занимающим фиксированное положение в слое, а также по локальному массообмену по высоте слоя в этих же системах. На основании сделанного обзора были сформулированы основные задачи исследования. В исследованиях был применен экспериментальный метод, основанный на уравнении массоотдачи, аналоге известного уравнения Ньютона-Рихмана для теплоотдачи, а для количественной характеристики использовался коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций диффундирующего вещества. В качестве модельного был выбран процесс сублимации (испарения) тел, выполненных из нафталина. Такой подход является традиционным для исследований массообмена и достаточно хорошо обоснован.

**Во второй главе** описаны экспериментальные установки, порядок проведения экспериментов и обработка опытных данных; следует отметить достаточно тщательный анализ погрешностей получения данных, влияния температуры слоя на внешний массообмен, и абразивный износ испытываемых тел. На основании большого экспериментального материала выполнен анализ влияния параметров вибрации, диаметра частиц, размеров модельных тел и высоты слоя на массообмен для тел, свободно плавающих в виброкипящем слое. Эти данные сопоставлены с соответствующими литературными данными по массообмену в псевдооживленном и по теплообмену в виброкипящем слоях. Отмечена не полная аналогия внешнего массо- и теплообмена в виброкипящем слое, связанная, как считает автор работы, с дополнительным механизмом за счет относительного движения частиц в непрерывной среде в слоях из средне- и крупнозернистого материала, увлекающих порции газа, обогащенные парами нафталина.

**В третьей главе** диссертант приводит многочисленные собственные экспериментальные данные по внешнему массообмену тел, занимающих фиксированное положение в слое и дает их анализ. В частности, рассмотрено влияние амплитуды и частоты вибрации, диаметра частиц, размеров модельных тел, высоты слоя. Выполнено сравнение полученных данных с результатами для свободно плавающих тел и сопоставление в аналогичных условия с данными по массообмену в псевдооживленном и по теплообмену в виброкипящем слоях.

Отмечаются более высокие значения коэффициентов массоотдачи  $\beta$  и особенности влияния диаметра частиц на характер их изменения в зависимости от размера тел и высоты слоя по сравнению с таковыми для свободно плавающих тел и практически монотонное увеличение коэффициентов  $\beta$  с ростом амплитуды и частоты вибрации. Автор обоснованно считает, что относительное ускорение вибрации  $K$  может являться обобщающим параметром в условиях проведенных экспериментов.

Для объяснения полученных результатов диссертант использует сведения о гидродинамических особенностях виброкипящего слоя в части пульсаций давления непрерывной среды, приводящих к пульсациям скорости фильтрации газовых потоков. Автор считает, что они существенны в слоях с размером частиц  $d_T \leq 1,0$  мм. Диссертант отмечает дополнительный фактор переноса массы (как и в предыдущей главе), имеющий место в слоях более крупных материалов и обусловленный относительным движением самих частиц и их групп в непрерывной среде. Подчеркиваются как общие, так и отличительные черты во внешнем массообмене в вибро- и псевдооживленных слоях. Отмечено практически монотонное увеличение коэффициентов массоотдачи с ростом относительного ускорения вибрации в виброкипящем и числа псевдооживления в кипящем слоях. Влияние диаметра частиц в виброкипящем слое носит сложный немонотонный характер с тенденцией к уменьшению коэффициентов массоотдачи в слое из крупнозернистых материалов, тогда как в псевдооживленном слое увеличение диаметра частиц

слоя приводит к росту внешнего массообмена, так как при прочих равных условиях требуется более высокая скорость фильтрации газа, увеличивающая конвективную составляющую переноса массы.

Результаты по внешнему массообмену для тел, занимающих фиксированное положение в слое, обобщены в виде эмпирического уравнения подобия, что позволяет использовать их в расчетной практике аналогичных процессов в пределах проверенных экспериментально интервалов определяющих чисел подобия. Особо следует отметить глубокую проработку составления этих уравнений, позволяющих обобщить столь сложный и многочисленный экспериментальный материал.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментального исследования локальных коэффициентов массоотдачи по высоте виброкипящего слоя с использованием вертикального цилиндрического образца общей длиной 100 мм, набранного из 10-ти одинаковых нафталиновых таблеток. Такие данные (весьма ограниченные) для псевдооживленного слоя были получены ранее, что позволило диссертанту сравнить их. Отмечаются как общие черты, так и отличительные особенности рассматриваемых систем. В частности, в обоих случаях наблюдаются вариации локальных коэффициентов массоотдачи в средней части слоя. Значительные количественные отличия имеются на концевых участках, причем в псевдооживленном слое высокие коэффициенты массоотдачи получены на нижнем концевом участке, так как наиболее интенсивно обтекается нижняя (лобовая) часть образца, а на верхнем образуется шапка из малоподвижного материала. В виброкипящем слое верхняя часть находится в активной зоне, что приводит к повышенной интенсивности массообмена.

Полученные данные по внешнему массообмену и их сравнение с аналогичными для псевдооживленного слоя, показывают, что по целому ряду свойств для соответствующих технологических решений виброкипящий слой

может быть вполне применим и даже иметь определенные преимущества по сравнению с традиционным псевдооживленным кипящим слоем.

Оценивая работу в целом следует отметить следующее.

**Работа обладает научной новизной**, теоретической и практической значимостью. Автором получены новые экспериментальные данные по внешнему массообмену в виброкипящем слое, как для свободно плавающих тел, так и занимающих фиксированное положение, а также по локальным коэффициентам массоотдачи по высоте слоя. В литературе такие сведения имеются лишь для псевдооживленного слоя. Приведенные результаты являются дополнительным вкладом в формирование физических представлений о внешнем массообмене в дисперсных системах с активными гидродинамическими режимами, и в частности, в виброкипящем слое, а в прикладном – создают основу для разработки инженерных методик расчета технологических процессов, протекающих при граничных условиях массообмена 3-го рода, и в частности, для окислительной перекристаллизации отработавшего топлива АЭС при выборе оптимальных режимных параметров вибрации и конструктивных размеров горизонтального виброаппарата лоткового типа.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 25 печатных работах, из них 4 в рецензируемых научных изданиях по списку ВАК. Кроме того, они широко обсуждались на 18 научных конференциях разного уровня.

Обоснованность выводов и научных положений, а также достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Автореферат полностью соответствует содержанию работы. Текст диссертации аккуратно оформлен, приведенный графический материал достаточно полно иллюстрирует изложение.

### **Основные замечания по работе**

1. В литературном обзоре имеются многочисленные ссылки на источники, описывающие процессы массообмена, однако современных

источников по внешнему массообмену в дисперсных системах не приводится.

2. Имеется ряд ошибок, затрудняющих понимание излагаемых материалов. В нескольких местах текста рисунки не следуют за первым о них упоминанием, а отстают более чем на одну страницу (рис. 1.6, 1.7, рисунки на стр. 60 – 64). В разделе 3 очень много ссылок на приложения. На рис. 3.16 – непонятно, где точки по альфа и бетта? Для лучшего понимания материалов было бы целесообразно переставить местами главы 2 и 3.

3. Деление сыпучих материалов по размерам на мелкие, средние и крупные является произвольным. Следовало хотя бы попытаться использовать широко известную диаграмму Гелдарта для характерных размеров частиц при псевдооживлении, разделяющую частицы по группам от «А» до «D».

4. На стр. 64 утверждается, что отличия в зависимости коэффициента массообмена от диаметра частиц слоя для мелких и крупных объектов связаны с возможностью перемещения мелких тел. Тогда для закрепленных тел должен быть наиболее явный минимум при  $d_T = 0,25$  мм и максимум при  $d_T = 0,4$  мм.

5. Сравнение на рис. 2.9 не вполне правомерно, так как сравниваются слои 150 и 60 мм. Возможно, что данные получены при постоянном числе оживления  $W$ , а это не аналог постоянной величины относительного ускорения вибрации  $K$ , то есть, с ростом размера при постоянном числе оживления имеется увеличение почти в квадрате.

6. Исследованы две высоты слоя 60 и 120 мм. Необходимо было бы дать пояснения, как влияет высота слоя, ведь для промышленных аппаратов она явно будет выше (для псевдооживленного слоя характерно значение 800 мм). Высота слоя должна как-то коррелироваться с размерами погруженных в слой частиц.

### **Заключение.**

Приведенные замечания не затрагивают существа основных положений, выводов и рекомендаций диссертации. Диссертация Горбуновой А.М. является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научно-техническом уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (п.9), а ее автор, Горбунова Анастасия Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
заведующий лабораторией специальных котлов  
отделения парогенераторов и топочных устройств,  
ОАО «Всероссийский теплотехнический  
научно-исследовательский институт» (ОАО ВТИ),  
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14,  
e-mail: [georgy.rjabov@gmail.com](mailto:georgy.rjabov@gmail.com), [vti@vti.ru](mailto:vti@vti.ru)  
тел. (495) 675-32-39  
10.03.2016 г.

Рябов Георгий  
Александрович

Подпись Г.А. Рябова заверяю

Генеральный директор ОАО «ВТИ»



  
Рябов Борис  
Федорович