

На правах рукописи
Арнольд Ф

Камело Амайя Арнолд Фигерар

**Совершенствование режимов работы и
аппаратурного оформления аппаратов с
циркуляционным кипящим слоем**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель: **Митрофанов Андрей Васильевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Кондратьев Александр Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», кафедра «Промышленная теплоэнергетика», профессор

Таршис Михаил Юльевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», кафедра теоретической механики и сопротивления материалов, профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Защита состоится «25» мая 2020 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.063.05 на базе Ивановского государственного химико-технологического университета по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр.-т., 7, ауд. Г-205.

Тел. (4932) 32-54-33. Факс: (4932) 32-54-33. E-mail: dissovnet@isuct.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного химико-технологического университета по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр.-т., 10 и на официальном сайте университета по ссылке: https://www.isuct.ru/sites/default/files/department/ighu/dissertacionnye-sovety/files/kamelo_amaya_arnold_figerar-21022020/diss_arn_p.pdf

Автореферат разослан « » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.063.05
д.ф.-м.н., профессор

Зуева Галина Альбертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одним из перспективных направлений повышения эффективности аппаратов с псевдооживленным слоем является выход за границы гидродинамических режимов безуносного кипящего слоя, в частности, организация переработки зернистых сред в аппаратах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Устройство ЦКС требует наличия двух элементов: основного аппарата с кипящим слоем для проведения целевого процесса, работающего в режиме, промежуточном между кипящим слоем и режимом пневмотранспорта, предполагающего унос частиц, а также опускной колонны, обеспечивающей осаждение и возврат твердой фазы в основной аппарат. Таким образом, ЦКС представляет собой систему с обратной связью, технологические параметры функционирования которой не сводимы к характеристикам отдельных ее составляющих: собственно кипящего слоя и возврата, поскольку эти характеристики взаимно влияют друг на друга. Независимые процессы в кипящем слое и тракте возврата достаточно широко исследованы теоретически и экспериментально. Однако при проектировании новых и модернизации существующих аппаратов с ЦКС принципиально важно знать, как эти процессы влияют друг на друга, при каких параметрах этих процессов ЦКС имеет преимущества перед обычным кипящим слоем, а при каких нет, когда возможна потеря устойчивости режима функционирования аппарата из-за блокировки потоков в элементах системы ЦКС. При этом важно выделить наиболее существенные параметры влияния, справедливые для широкого спектра осуществляемых в кипящем слое процессов (нагрева и охлаждения частиц, их сушки, гранулирования, физико-химических процессов). Ответ на эти вопросы на чисто эмпирической основе является нереалистичным не только из-за большого объема и трудности получения опытных данных, но и из-за многообразия процессов, для проведения которых используется ЦКС. Поэтому естественным является применение методов математического моделирования, то есть построения таких моделей, в которых процессы в кипящем слое и контуре возврата описываются на уже известной основе, а целью моделирования является именно исследование взаимного влияния их характеристик.

В этой ситуации дальнейшее расчетно-экспериментальное исследование и совершенствование процессов в циркуляционном кипящем слое является актуальной научной и технологической задачей, что и определило цель настоящей работы, которая выполнялась в рамках гранта РФФИ (проект 18-08-00028 А) и международного договора о научно-техническом сотрудничестве между ИГЭУ и университетом г. Кампинас, Бразилия.

Объект исследования: аппараты с циркуляционным кипящим слоем газ-твердое.

Предмет исследования: формирование массопотоков дисперсной фазы и их рациональная организация с точки зрения устойчивости функционирования и производительности аппаратов с циркуляционным кипящим слоем.

Целью работы является совершенствование режимов работы и аппаратурного оформления аппаратов с циркуляционным кипящим слоем для повышения их производительности и качества готовых продуктов.

Реализация цели предполагает решение следующих задач исследования:

1. разработать математическую модель и метод расчета формирования потоков газ-взвеси в аппаратах с циркуляционным кипящим слоем, позволяющих учитывать взаимное влияние параметров распределения частиц по высоте кипящего слоя и потока материала из контура возврата, и на основе численных экспериментов выявить основные факторы, определяющие производительность аппарата и интенсивность протекания технологического процесса в нем;
2. подтвердить результаты численных экспериментов с разработанной моделью и прогнозирующие возможности предложенного метода расчета на примере экспери-

ментального исследования процесса сушки сыпучего материала в оригинальных лабораторных установках с циркуляционным кипящим слоем;

3. разработать компьютерный инженерный метод поверочного расчета режимных параметров тепломассообмена и формирования массопотоков сыпучего материала в сушилке с циркуляционным кипящим слоем и выполнить его опытно-промышленную апробацию;
4. предложить новые конструкции аппаратов с циркуляционным кипящим слоем.

Направление исследования отвечает паспорту специальности **05.17.08. «Процессы и аппараты химических технологий»**. Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами **паспорта специальности ВАК: в части формулы специальности** – «...содержание которой базируется на физических и химических явлениях (перенос энергии и массы, химические превращения, катализ, физико-химические воздействия на перерабатываемые материалы и т.п.)...», «...научная дисциплина ориентирована на совершенствование аппаратурного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения, использование особенностей нестационарных режимов с позиции экологической безопасности и надежности химических процессов и производств...»; **в части области исследования специальности** – «Фундаментальные разработки в изучении явлений переноса энергии и массы в технологических аппаратах.»; «Способы, приемы и методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещения сыпучих материалов, исследование тепловых процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов. Методы изучения химических процессов и аппаратов, совмещенных процессов. Приемы, способы и методология изучения нестационарных режимов протекания процессов в химической аппаратуре».

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Предложены математическая модель и метод расчета формирования потоков сыпучего материала в аппаратах с циркуляционным кипящим слоем, позволяющий учесть взаимное влияние параметров распределения частиц по высоте кипящего слоя и потока материала из контура возврата.
2. Показано, что одним из факторов, наиболее существенно влияющих на производительность аппаратов с периодическим циркуляционным кипящим слоем, является время задержки материала в контуре возврата. С ростом времени задержки производительность аппарата и интенсивность основного технологического процесса снижаются, что может стать лимитирующим фактором применения аппаратов с циркуляционным кипящим слоем.
3. Теоретически исследовано функционирование аппаратов с циркуляционным кипящим слоем непрерывного действия и показано, что с учетом распределения концентрации твердой фазы по высоте кипящего слоя существует оптимальное по высоте слоя положение подвода возврата материала из контура циркуляции, позволяющее повысить производительность без снижения качества целевого продукта.
4. На примере экспериментального исследования процесса сушки сыпучего материала в оригинальных лабораторных установках с периодическим циркуляционным кипящим слоем подтверждена прогностическая эффективность предложенного метода расчета и выявлены преимущества сушки в циркуляционном кипящем слое.

Теоретическая значимость:

1. разработанная математическая модель формирования потоков сыпучего материала в аппаратах с циркуляционным кипящим слоем, позволяющая учесть взаимное влияние параметров распределения частиц по высоте кипящего слоя и потока материала из контура возврата, является определенным вкладом в развитие теоретических основ расчета аппаратов с циркуляционным кипящим слоем;
2. теоретически показано, что существенным фактором, влияющим на производительность аппаратов с периодическим циркуляционным кипящим слоем, является время задержки материала в контуре возврата;

3. теоретически показано, что для аппаратов с циркуляционным кипящим слоем непрерывного действия, с учетом распределения концентрации твердой фазы по высоте кипящего слоя, существует оптимальное по высоте слоя положение подвода возврата материала из контура циркуляции, позволяющее повысить производительность без снижения качества целевого продукта.

Практическая ценность результатов состоит в следующем:

1. Разработан компьютерный инженерный метод поверочного расчета режимных параметров теплообмена и формирования массопотоков сыпучего материала в сушилке с циркуляционным кипящим слоем, защищенный зарегистрированной программой для ЭВМ.
2. Разработаны новые конструкции аппаратов с циркуляционным кипящим слоем, в том числе, аппарат с возможностью позиционирования подвода возврата в кипящий слой, защищенные двумя патентами на полезные модели.
3. Средства программной поддержки моделирования и расчета режимных параметров теплообмена и формирования массопотоков сыпучего материала в циркуляционном кипящем слое были применены на МУП «Спецавтотранс» (г.Череповец, Вологодская область) для проектирования и запуска пилотной установки для сушки дробленых отходов термопластиков в циркуляционном кипящем слое.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены на основе математических моделей, базирующихся на теории цепей Маркова, путем численных экспериментов. Экспериментальные исследования проводились на оригинальных лабораторных и пилотных установках с использованием современных средств измерительной техники.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные нелинейные математические модели кинетики формирования массопотоков сыпучего материала и степени его переработки в циркулирующем кипящем слое, а также основанный на этих моделях компьютерный инженерный метод расчета указанных характеристик циркуляционного кипящего слоя.
2. Анализ и обоснование режимов работы аппаратов, в которых использование циркуляционного кипящего слоя позволяет получить более высокую производительность по сравнению с другими режимами псевдоожижения.
3. Результаты оптимизации предельной производительности циркулирующего кипящего слоя непрерывного действия путем выбора положения подвода возврата с учетом аксиальной неоднородности кипящего слоя.
4. Методика расчета и результаты экспериментального исследования процесса сушки модельных материалов в установках с циркулирующим кипящим слоем.
5. Новые конструкции аппаратов с циркулирующим кипящим слоем.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования обоснована корректностью математических моделей, основанных на фундаментальных уравнениях баланса массы, применением оригинальных методов и установок для экспериментального исследования, хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных. Основные результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах и прошли апробацию на конференциях различного уровня.

Личный вклад автора состоит в выборе направления исследований, постановке конкретных задач по моделированию и разработке их программно-алгоритмического обеспечения, разработке методик экспериментов и их реализации, научном анализе и интерпретации полученных результатов. Изложенные в диссертации результаты отражают самостоятельные исследования автора.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 4-х международных конференциях: Int. Symposium of Reliable Flow of Particulate Solids; "RELPOWFLO V", 13-15 June 2017, Skien, Norway; Международном научно-техническом

семинаре «Сушка, хранение и переработка продуктов растениеводства», посвященном 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева, 22-23 мая 2018 г., Москва; 18-й международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. 4-7 сентября 2018 г., Плес; XIII Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование», Иваново, 2018.

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 14-ти опубликованных работах, в том числе, в 7-и статьях в ведущих рецензируемых изданиях (по списку ВАК), из числа которых 3 издания индексируются в Web of Science (Core Collection) или Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов по работе, списка использованных источников из 137 наименований, приложения. Текст диссертации изложен на 116 стр. машинописного текста, содержит 32 рисунка и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализировано современное состояние вопроса организации контактирования потока газа и слоя дисперсных частиц при проведении тепломассообменных процессов. Показано, что актуальной задачей при организации подобных пневматических систем является повышение скорости скольжения или времени пребывания частиц в потоке, которое может быть достигнуто за счет организации рециркуляции твердой фазы и/или рекуперации ожижающего агента. Указанная задача может быть успешно решена с применением техники циркуляционного кипящего слоя (ЦКС). ЦКС – это двухфазная система газ-твердое, режим движения фаз в которой занимает промежуточное положение между режимом вертикального пневмотранспорта и пузырьковым кипящим слоем. Расчет технологических процессов в ЦКС в целом может быть построен на тех же принципах, что и для аппаратов с псевдооживленным слоем, хотя гидродинамические особенности переходных режимов от псевдооживления к пневмотранспортированию изучены хуже, чем соответствующие предельные состояния. Наиболее же трудными для разрешения принципиальными вопросами перехода к расчету ЦКС является необходимость согласования и увязки конечных характеристик продукта с характеристиками материала поступающего из тракта возврата твердой фазы с учетом режима его поступления (временной задержки в тракте возврата).

Анализ подходов к математическому моделированию и расчету процесса показал, что наиболее рациональным выбором учета связей между основным аппаратом (подъемной колонной) и трактом возврата могут стать ячеечные модели, которые не только существенно снижают объем вычислений по сравнению с наиболее часто используемыми в настоящее время комбинированными (основанными на сочетании подходов Эйлера-Лагранжа) моделями взвесенесущих потоков, но позволяют сократить число параметров идентификации. Развитие средств компьютерной поддержки математических операций с матрицами показало, что наиболее эффективным и доступным средством работы с ячеечными моделями является аппарат теории цепей Маркова. Применение этого подхода к моделированию псевдооживленного состояния достаточно разработано и апробировано различными авторами. Однако его обобщение на случай описания системы аппаратов, образующих ЦКС, отсутствует, что сдерживает поиск рациональных режимов их эксплуатации и проектирование новых эффективных аппаратов. Именно на решение этой задачи и направлена настоящая работа. В заключении главы детализированы основные задачи исследования.

Во второй главе выполнена разработка и эмпирическая проверка математической модели функционирования аппарата ЦКС, работающего в периодическом режиме. В главе приводятся результаты численных экспериментов с моделью, эмпирические зависимости, необходимые для количественной оценки основных операторов модели, а также результаты выполненных самостоятельно расчетно-экспериментальных исследований процесса сушки дисперсного материала в лабораторной установке с ЦКС, подтверждающие прогностические возможности модели.

В качестве основы построения моделей в работе принята теория цепей Маркова, математический аппарат которой инвариантен к природе описываемых явлений и достаточно часто используется для построения моделей технических систем. В настоящей работе рассматриваются модели, наиболее применимые в химической инженерии и относящиеся к использованию цепей с конечным числом состояний и дискретным временем. Пространство аппарата разбивается по высоте на ячейки малого, но конечного размера Δx , а текущие характеристики процесса организуются в вектор-столбцы состояния (например, S_A и S_B – векторы, содержащие объемы частиц различных компонентов сыпучего материала в ячейках цепи; S_g – вектор, содержащий объемы оживающего воздуха в ячейках и т.д.). Используемая для численных экспериментов расчетная схема модели ЦКС показана на рисунке 1. Высота основного аппарата установки ЦКС разделена на m ячеек идеального смешения. Для упрощения формализации процесса рассматривается только два компонента (А – сырьевой материал, В – готовый продукт).

Изменение во времени состояния процесса фиксируется через малые конечные промежутки времени Δt , а переход из одного состояния в другое описывается при помощи рекуррентных расчетных процедур вида:

$$S_A^{k+1} = P_A^k (S_A^k - \Delta S_{AR}^k + \Delta S_{Ain}^k - \Delta S_{Aout}^k), \quad (1)$$

$$S_B^{k+1} = P_B^k (S_B^k + \Delta S_{AR}^k + \Delta S_{Bin}^k - \Delta S_{Bout}^k), \quad (2)$$

где k – номер рекуррентного перехода (так как продолжительность каждого перехода Δt , то состояние S^k относится к дискретному моменту времени $t_k=(k-1)\Delta t$); P_A и P_B – матрицы переходных вероятностей (переходные матрицы), различные для компонентов А и В, так как физико-механические свойства частиц этих компонентов полагаются различными.

Переходные матрицы P_A и P_B содержат вероятности переноса частиц А и В вдоль соответствующих цепей. При этом считается, что в течение временного промежутка Δt частица может остаться в наблюдаемой ячейке или переместиться в одну из соседних ячеек. При идентификации вероятностей принято выделять симметричную (диффузионную) и несимметричную компоненты переходных вероятностей, которые связаны с размерными характеристиками процесса соотношениями: вероятность несимметричного переноса $w=W\Delta t/\Delta x$ (где W – размерная физическая скорость газа); вероятность диффузионного переноса $d=D\Delta t/\Delta x^2$ (где D – размерный коэффициент макроdiffузии частиц). Подробное описание идентификационных процедур и правила построения этих матриц приведены в диссертации. Важно отметить некоторые свойства переходных матриц как основных операторов предлагаемой математической модели. Во-первых, при переходе от описания одного аддитивного свойства к описанию другого (например, числа частиц, теплоты в них и др.)

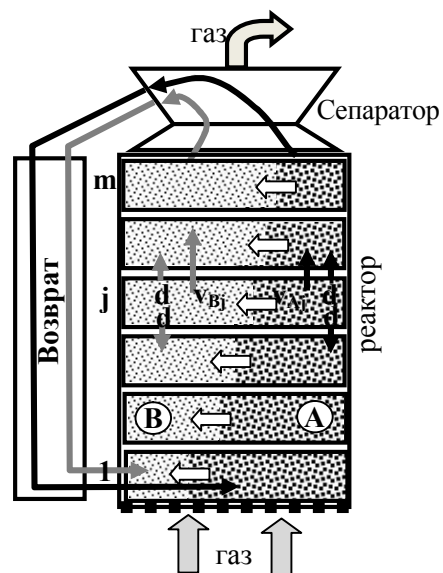


Рис.1. Модельное представление периодического циркуляционного кипящего слоя

корректировка переходной матрицы не требуется (так как, например, доля переносимой частицами теплоты соответствует доле переносимого материала). Во-вторых, переходные матрицы ставятся в соответствие размерным характеристикам процесса, которые в общем случае являются нестационарными из-за протекания технологических процессов, поэтому элементы переходных матриц рассчитываются для каждого k-го шага, что делает предлагаемую в работе модель нелинейной.

В аппарате реализуется технологический процесс, который в модели может быть интерпретирован как переход $A \rightarrow B$ (на временном интервале Δt некоторая доля S_A переносится в вектор S_B). Вектор ΔS_{AR}^k описывает кинетику превращения $A \rightarrow B$. Элемент с номером j этого вектора определяются соотношениями:

$$\Delta S_{ARj}^k = \alpha_j^k S_{Aj}^k \Delta t = \alpha_0 (w_j^k / w_s)^{n_R} S_{Aj}^k \Delta t, \quad (3)$$

где α_j^k – постоянная скорости превращения $A \rightarrow B$, которая считается зависящей от локальной скорости w_j^k обтекания частиц фракции A ; w_s , α_0 и n_R – постоянные параметры. В дальнейшем для моделирования и расчета процесса сушки модельных частиц введенное здесь формальное уравнение кинетики превращения (3) будет заменено соответствующими уравнениями тепло- и влагопереноса газ-твердое.

Поскольку рассматривается периодический процесс, то последняя ячейка цепи представляет собой идеальный сепаратор, из которого все частицы направляются в тракт возврата или классификатор (если предусматривается унос материала из системы ЦКС и связанные с этим материальные потери). Соответственно, векторы стоков ΔS_{Aout}^k и ΔS_{Bout}^k имеют единственный ненулевой элемент для верхней ячейки реактора $j=m$. Это количества фракций A и B , выходящих в течение Δt из реактора в сепаратор:

$$q_{Ar}^k = S_{A,m}^k v_{A,m}^k, \quad q_{Br}^k = S_{B,m}^k v_{B,m}^k, \quad (4)$$

где v_m^k – скорости выхода фракций из верхней ячейки.

Потоки возврата q_{Ar} и q_{Br} подаются в контур циркуляции, процесс в котором считается идеальным вытеснением с временем задержки k_d . Пройдя контур, они подаются в нижнюю ячейку основного аппарата. Тогда элементы слагаемых-источников ΔS_{Ain}^k и ΔS_{Bin}^k в зависимостях (1)-(2) определяются как:

$$\Delta S_{Ain}^k(1) = 0 \text{ и } \Delta S_{Bin}^k(1) = 0, \text{ если } k \leq k_d, \quad (5)$$

$$\Delta S_{Ain}^k(1) = q_{Ar}^{k-k_d} \text{ и } \Delta S_{Bin}^k(1) = q_{Br}^{k-k_d}, \text{ если } k > k_d, \quad (6)$$

Остальные элементы векторов ΔS_{Ain}^k и ΔS_{Bin}^k равны нулю ($\Delta S_{Ain}^k(j) = 0$ и $\Delta S_{Bin}^k(1) = 0$ при $j \neq 1$). Описанная выше модель позволяет рассчитывать переходные и установившиеся процессы в ЦКС.

Движение оживающего газа вдоль цепи ячеек описывается аналогичными (1)-(2) балансовыми уравнениями с помощью матрицы переходных вероятностей для газа P_g :

$$S_g^{k+1} = P_g^k S_g^k + \Delta S_{gc}^k + S_{gf}, \quad (7)$$

где P_g – переходная матрица для газа; ΔS_{gc} – вектор перемещений газа в результате циркуляции через тракт возврата (процедура его формирования будет описана далее); S_{gf} – вектор источников газовой фазы, имитирующий поступление воздуха под газораспределитель для создания псевдооживленного слоя и имеющий единственный ненулевой элемент для нижней ячейки $S_{gf,j} = G_g \Delta t$, если $j=1$, и $S_{gf,j} = 0$, если $1 < j \leq n$, где G_g – расход оживающего газа.

На рисунках 2 и 3 приведены некоторые результаты численных экспериментов для периодического процесса (см. рис.1). Рисунок 2 иллюстрирует эволюцию распределения содержания фракций A и B в основном аппарате при задержке времени циркуляции возврата $k_d=20$.

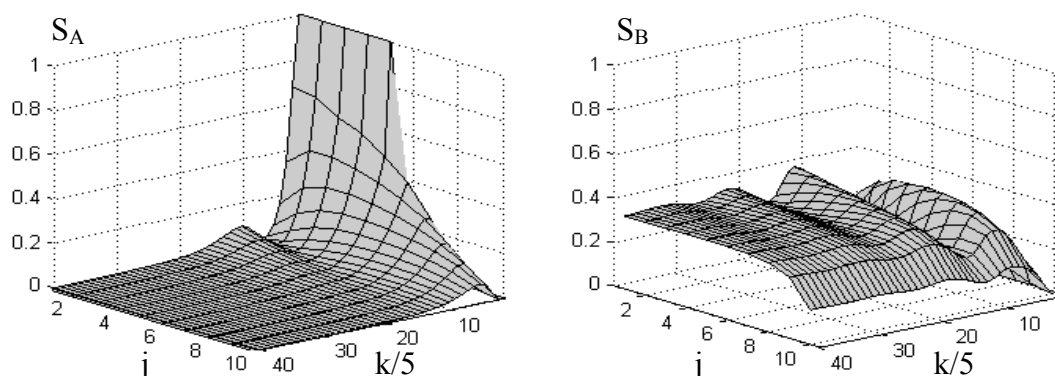


Рис.2. Эволюция распределения фракций А и В по высоте реактора ($m=10, v_{sA}=0.1, v_{sB}=0.3, \alpha_0=0.03, n_R=0.4, k_d=20$)

Очевидно (рис.2), что переходный процесс носит волновой характер, который вызван именно задержкой материала в тракте возврата. При этом готовая фракция В продолжает циркулировать в контуре, что может быть отнесено к недостаткам периодического процесса, так как она просто загромождает реактор.

На рисунке 3 показано влияние безразмерной расходной скорости газа в реакторе на продолжительность процесса, при которой фракция А превращается в В на 95%, при различных временах задержки. При малых скоростях превращение идет в плотном слое, и скорость превращения растет с ростом скорости газа благодаря интенсификации процессов переноса между частицами и газом. Начиная с некоторой скорости, наступает псевдооживление компонента А, но циркуляция еще не наступает. Здесь также скорость превращения монотонно возрастает с ростом скорости газа.

После скорости газа, соответствующей началу циркуляции, поведение кривой существенно зависит от времени задержки в контуре циркуляции. При малых временах скорость превращения продолжает возрастать с ростом скорости газа, но уже, начиная с $k_d=20$, возрастание сменяется убыванием, тем более существенным, чем больше время задержки. Таким образом, снижение времени задержки в контуре циркуляции возврата является реальным направлением повышения производительности аппаратов ЦКС периодического действия.

Указанный вывод был учтен при проведении дальнейшего исследования. В частности, для проверки прогнозирующей способности модели была разработана и изготовлена лабораторная сушилка ЦКС периодического принципа действия, схема которой показана на рисунке 4. Обратный тракт установки был выполнен из трубок с максимальным диаметром в свету 3 см, а колонна основного аппарата имела прямоугольное поперечное сечение $5,5 \times 11$ см. Такой выбор размеров обеспечил малое время пребывания материала в возвратном контуре. Наблюдение за меченой частицей позволили сделать вывод, что время пребывания в основном реакторе в 10-12 раз превосходит время пребывания в тракте возврата. Последнее позволило при расчетах принять допущение о мгновенном перемещении частиц из верхней ячейки цепи в первую (принять $k_d=0$).

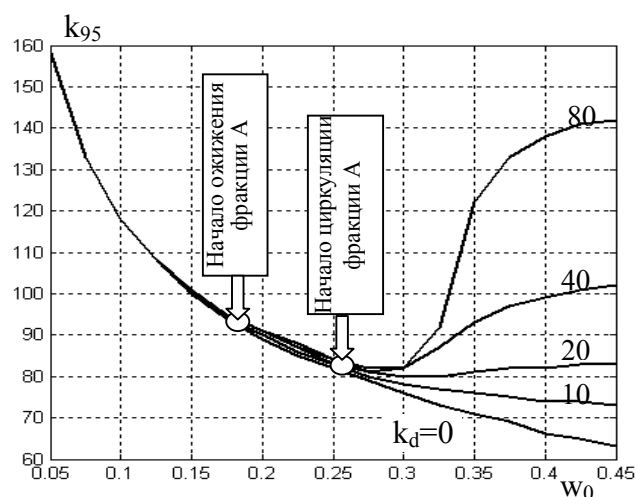


Рис.3. Влияние расходной скорости газа на продолжительность переработки частиц на 95% при различных временах задержки циркуляции ($m=10, v_{sA}=0.1, v_{sB}=0.3, \alpha_0=0.03, n_R=0.4$)

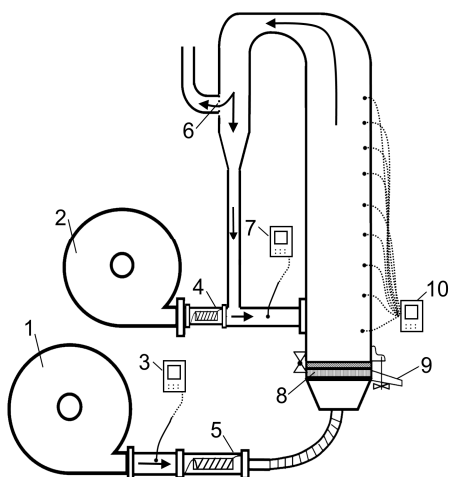


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1, 2 – воздуходувки; 3 – термоанемометр; 4, 5 – электрокалориферы; 6 – стальная сетка; 7 – термоанемометр; 8 – газораспределительная решетка; 9 – поворотное устройство с лотком для выгрузки сыпучего материала; 10 – многоканальный термогигрометр

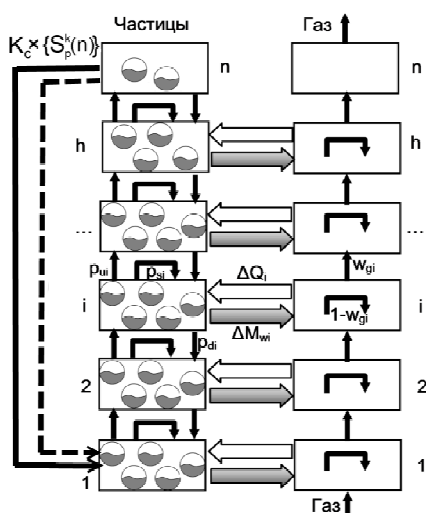


Рис. 5. Расчетная схема модели сушки частиц

Подача сушильного агента в основной цилиндрический реактор осуществлялась воздуходувкой 1. Обратный поток частиц поддерживается дополнительной воздуходувкой 2. Температура и скорость воздуха, нагнетаемого воздуходувками и подогреваемого электрокалориферами 4 и 5, измерялась двумя термоанемометрами 3 и 7 модели РСЕ424. Для предотвращения уноса материала на выходе из аппарата размещалась стальная сетка 6 с квадратными ячейками 1×1 мм. Газораспределительная решетка 8 основного аппарата была смонтирована на поворотном устройстве, которое в закрытом состоянии обеспечивало герметичность аппарата, а в открытом состоянии позволяло по лотку 9 выгрузить сыпучий материал (в приведенных ниже примерах это 175 г. чечевицы с размером частиц 2,7 мм) для взвешивания и определения его влагосодержания (начальное влагосодержание материала – $X_0=0,05$ г.вл./г.сух.).

По высоте корпуса основного аппарата с шагом 10 см, начиная с уровня газораспределительной решетки, были выполнены отверстия, в которые затем были вставлены воздухопроницаемые колпачки из сетки с ячейкой 0,5×0,5 мм. Колпачки имели цилиндрическую форму с диаметром 10 мм и высотой 35 мм. Такой размер соответствовал датчикам восьмиканального термогигрометра 10 (модель ИТВ2605-8), что позволяло измерить относительную влажность и температуру сушильного агента в различных зонах основного аппарата. Кроме того, в процессе эксперимента датчики термогигрометра последовательно извлекались и заменялись на датчик одного из термоанемометров, что позволяло измерить локальную скорость воздуха w в стесненном потоке газозвеси при расходной скорости воздуха W_0 .

Представленная на рисунке 1 принципиальная расчетная схема моделирования ЦКС поясняется схемой, показанной на рисунке 5, на которой для конкретизации описания межфазного взаимодействия

представлены две цепи: одна для частиц, другая – для сушильного агента. Отсутствие деления частиц на компоненты в данном случае оправдано тем, что процесс периодический и после выгрузки навески из аппарата контролируемым параметром будет только общее влагосодержание, кроме того в аппарат загружалась монофракция частиц. Таким образом, считается, что в аппарате присутствует только фракция А, и для описания продольного переноса частиц и сушильного агента достаточно уравнений вида (1) и (7).

Добавление вектора ΔS_{gc} (формула (7)) обеспечивает перевод одного и того же количества воздуха из последней ячейки в первую. Значения элементов этого вектора рассчитываются особым образом для первой и последней ячеек, а именно: $\Delta S_{gc}^k(n) = -K_r \cdot S_g^k(n)$ и $\Delta S_{gc}^k(1) = K_r \cdot S_c^k(1)$, где K_r – модельный коэффициент, отражающий долю возвращаемого в основной аппарат воздуха через тракт возврата (при описании

эксперимента были приняты следующие значения: $K_r=0,2$ и остальные элементы векторов ΔS_{gc} равны нулю ($\Delta S_{gc}^k(j)=0$, если $1 < j \leq n$).

Баланс массы влаги в частицах с учетом их распределения по высоте сушилки описывается следующим равенством:

$$M_{wA}^{k+1} = P_A^k (M_{wA}^k - \beta \cdot F^k \cdot (p_{ws}^k - p_{wg}^k) \Delta t) + ((\Delta S_{Ain}^k - \Delta S_{Aout}^k) / S_A^k) \cdot M_{wA}^k, \quad (13)$$

где M_{wA} – вектор содержания влаги в ячейках для частиц, β – вектор коэффициентов влагоотдачи, p_{ws} – парциальное давление насыщенного пара на поверхности частиц, p_{wg} – парциальное давление паров влаги в сушильном агенте; символ «./» означает поэлементное выполнение математической операции деления.

Эволюция распределения по высоте аппарата содержания влаги в сушильном агенте описывается следующим равенством:

$$M_{wg}^{k+1} = P_g^k (M_{wg}^k + \beta \cdot F^k \cdot (p_{ws}^k - p_{wg}^k) \Delta t) + (\Delta S_{gc}^k / S_g^k) \cdot M_{wg}^k + M_{wgf}, \quad (14)$$

где M_{wg} – вектор содержания влаги в ячейках для газовой фазы, M_{wgf} – вектор источников влаги с поступающим сушильным агентом. Он содержит единственный ненулевой элемент для ячейки, в которую подается газ.

Расчет парциальных давлений насыщенного пара на поверхности частиц и в сушильном агенте производился по заимствованным из литературных источников зависимостям, которые приведены в диссертации.

Вместе с содержанием частиц переносится и любое, присущее им аддитивное свойство. Уравнение баланса теплоты в частицах и газе с учетом поперечных и продольных переносов имеют вид:

$$Q_A^{k+1} = P_A^k (Q_A^k + \alpha \cdot F^k \cdot (T_g^k - T_A^k) \Delta t - r_w \cdot \beta \cdot F^k \cdot (p_{ws}^k - p_{wg}^k) \Delta t) + ((\Delta S_{Ain}^k - \Delta S_{Aout}^k) / S_A^k) \cdot Q_A^k, \quad (15)$$

$$Q_g^{k+1} = P_g^k (Q_g^k - \alpha \cdot F^k \cdot (T_g^k - T_A^k) \Delta t) + (\Delta S_{gc}^k / S_g^k) \cdot Q_g^k + Q_{gf}, \quad (16)$$

где Q_A – вектор теплоты в ячейках для частиц ($Q_A = T_A \cdot c \cdot \rho$, где c – вектор теплоемкостей влажных частиц, ρ – вектор плотностей влажных частиц), α – вектор локальных коэффициентов теплоотдачи от газа к частицам, F – вектор поверхностей теплообмена в ячейках, T_A и T_g – векторы температур частиц и газа, соответственно, Q_g – вектор теплоты в ячейках для газа, Q_{gf} вектор теплоты, входящей с подводимым газом, r_w – удельная теплота испарения влаги.

Определяемые критерии тепломассообмена рассчитывались как¹:

$$Nu = 2 + 0,6 \cdot Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3}, \quad (17)$$

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot Re_p^{1/2} \cdot Sc^{1/3}, \quad (18)$$

где Sc – число Шмидта, Pr – число Прандтля, Re_p – число Рейнольдса, рассчитанное по эквивалентному размеру частицы и локальной скорости движения воздуха в ячейке.

Некоторые результаты исследования представлены на рисунках 6 и 7. На рисунке 6 показана кинетика сушки навески модельного материала (монофракции чечевицы) при различных фиктивных скоростях воздуха: 4,24 м/с – кипящий слой (без циркуляции) и 6,14 м/с – в режиме ЦКС (горизонтальная линия соответствует равновесной влажности). Рисунок 7 показывает, распределение концентрации частиц по высоте подъемной колонны лабораторного аппарата ЦКС. Экспериментальные значения были получены по результатам измерения скоростей оживающего воздуха на различных отметках подъемной колонны.

¹ Bird, R.B. Transport Phenomena / R.B. Bird, W.E. Steward, E.N. Lightfoot. – NY. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 560 p.

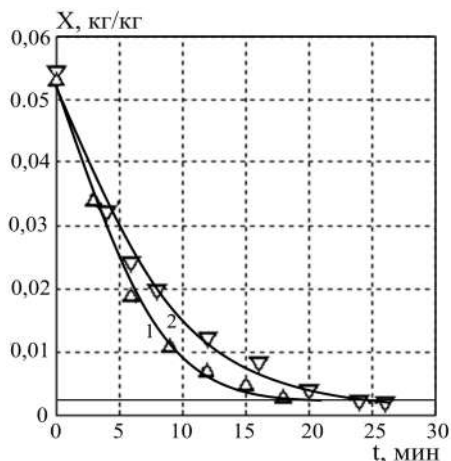


Рис.6. Кинетика сушки частиц чечевицы (линия – расчетные значения, точки – экспериментальные): ∇ – $W_0=4.24$ м/с (линия 1), кипящий без циркуляции; Δ – $W_0=6.14$ м/с (линия 2), циркулирующий слой

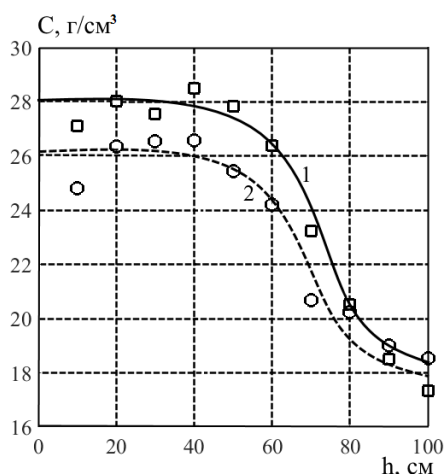


Рис. 7. Распределение концентрации твердой фазы по высоте подъемной колонны лабораторной установки (рис. 4) при фиктивной скорости воздуха $W_0=6.14$ м/с: 1 – распределение к моменту времени 2 мин от начала процесса (\square – эксперимент, линия – расчет); 2 – распределение к моменту времени 25 мин от начала процесса (\circ – эксперимент, линия – расчет)

повышает адекватность описания процесса теплообмена. Видно (рис.6), что увеличение скорости газа и переход к режиму ЦКС позволяет значительно сократить время достижения равновесной влажности, при этом распределение материала по высоте подъемной колонны ЦКС не является равномерным и хорошо прогнозируется с помощью модели (рис.7): разница между расчетными прогнозами и экспериментальными данными незначительно превышает 5% только для первой ячейки, что, вероятно, можно объяснить влиянием зоны гидродинамической стабилизации вблизи газораспределительной решетки.

Измерение локальных скоростей не являлось необходимыми для идентификации параметров модели, но служило средством проверки гидромеханического расчета слоя, основанного на балансовых соотношениях (1), (7) и процедурах, на базе которых производилась оценка элементов соответствующих переходных матриц.

Формирование последних проводилось на основе заимствованных² соотношений, устанавливающих:

- связь между локальной скоростью воздуха и содержанием частиц в ячейке:

$$w = \frac{w_0}{1 - \varepsilon \frac{S_{\Sigma}^k}{S_{\max}}}, \quad (19)$$

где S_{Σ} – объемное содержание частиц всех фракций в ячейке; S_{\max} – объемная концентрация частиц, соответствующая плотному слою и порозности ε ;

- связь между коэффициентом макродиффузии D частиц и локальной скоростью воздуха w

$$D=0,001 \cdot (H_{fb}/H_0) \cdot (w-W_0), \quad (20)$$

где H_{fb} – высота слоя (в случае ЦКС, совпадающая с высотой подъемной колонны); H_0 – высота плотного слоя материала в колонне;

- связь между вероятностью несимметричного переноса частицы v и локальной скоростью воздуха:

$$v=(w - V_s) \Delta t/\Delta x, \quad (21)$$

где V_s – скорость витания одиночной частицы, связанная с ее весом и коэффициентом сопротивления C_d . Значение последнего определялось по критериальной зависимости:

$$C_d=Ar^{0,89}/Re^{1,79}, \quad (22)$$

где Ar – число Архимеда.

Соотношения (19)-(22) позволяют выполнить замыкание гидромеханической модели слоя (1),(7) и позволяют с приемлемой для инженерных задач точностью прогнозировать распределения (рис.7) и скорости движения фаз слоя, а также дают возможность рассчитывать зависящие от этих скоростей коэффициенты тепло- и массообмена как локальные характеристики (отдельно для каждой ячейки), что

²A.V. Mitrofanov, V.E. Mizonov, K. Tannous, L.N. Ovchinnikov. A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties // Particulate Science and Technology – 2018. – Vol. 36. – No. 2. – pp. 244-253.

В третьей главе выполнено обобщение предложенной модели периодического ЦКС на случай непрерывного процесса. Расчетная схема модели показана на рисунке 8, при этом базовые балансовые уравнения (1)-(2) и (7) остаются справедливыми, однако, меняется порядок формирования вектора-источников ΔS_{Ain}^k и векторов стоков частиц ΔS_{Aout}^k и ΔS_{Bout}^k . В теоретическом исследовании непрерывного режима ЦКС (результаты показаны на рисунках 9-10) в подъемной колонне аппарата реализуется технологический процесс, кинетика которого определяется соотношением (3)), и следствием протекания которого является переход $A \rightarrow B$. Гидродинамическим последствием превращения $A \rightarrow B$ является изменение скорости витания частиц фракции А, вызванное изменением их размера и/или плотности $v_{sA} \rightarrow v_{sB}$.

При непрерывной организации работы установки материал, удаляемый из последней ячейки цепи, попадает в классификатор, разделяющий компоненты А и В в выгружаемый продукт (е) и возврат (г). Качество классификации определяется критерием Луйкена-Ханкока Е, который позволяет рассчитать относительные выходы фракций в готовый продукт как $f_B = 1/2 + E/2$ и $f_A = 1/2 - E/2$. Таким образом,

$$q_{Ae}^k = q_{Aout}^k f_A, \quad q_{Be}^k = q_{Bout}^k f_B, \quad (23)$$

$$q_{Ar}^k = q_{Aout}^k (1 - f_A), \quad q_{Br}^k = q_{Bout}^k (1 - f_B). \quad (24)$$

Для идеального классификатора (непрерывный процесс) $E=1$, и в готовый продукт выводится чистая фракция В, для идеального сепаратора (периодический процесс) $f_B=f_A=0$, и обе фракции полностью уходят в возврат.

Потоки возврата q_{Ar} и q_{Br} , пройдя контур циркуляции, с временем задержки k_d подаются в нижнюю ячейку основного аппарата вместе с порцией потока подачи сырья g в непрерывном процессе, соответственно вместо уравнений (5)-(6) следует использовать следующие:

$$\Delta S_{Ain}^k(1) = g \text{ и } \Delta S_{Bin}^k(1) = 0, \text{ если } k \leq k_d, \quad (25)$$

$$\Delta S_{Ain}^k(1) = q_{Ar}^{k-k_d} + g \text{ и } \Delta S_{Bin}^k(1) = q_{Br}^{k-k_d}, \text{ если } k > k_d, \quad (26)$$

где $g=G\Delta t$, G – производительность подачи сырья (фракции А).

При моделировании непрерывного ЦКС (рис.8) переходные процессы (и время задержки) играют меньшую роль, так как основную часть времени аппарат работает в стационарном режиме. Здесь особую роль играет производительность подачи

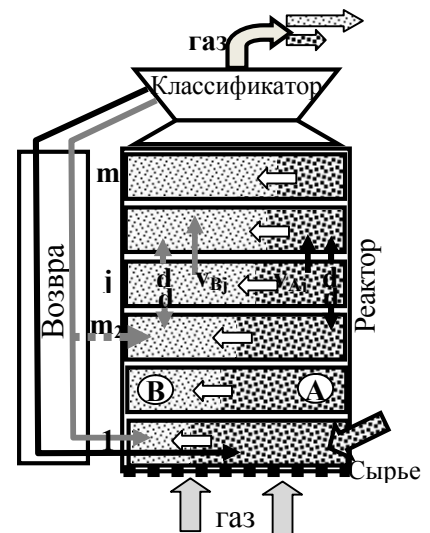


Рис.8. Модельное представление непрерывного

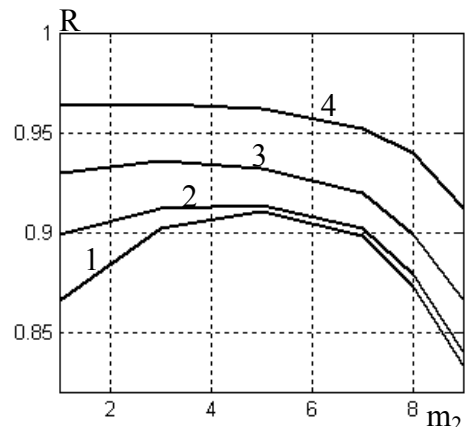


Рис.9. Влияние позиции подвода возврата на содержание готовой фракции: 1 – E=0; 2 – 0.25; 3 – 0.5; 4 – 0.75 ($\alpha_0=0.03$, $w=0.35$, $v_{s1}=0.3$, $v_{s2}=0.1$, $k_d=40$, $d=0.05$)

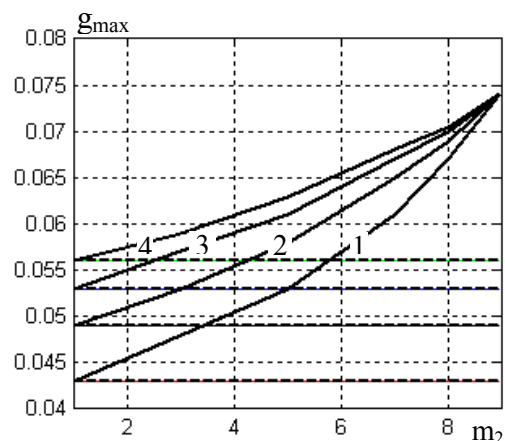


Рис.10. Влияние позиции подвода возврата на предельную производительность: 1 – E=0; 2 – 0.25; 3 – 0.5; 4 – 0.75 ($\alpha_0=0.03$, $w=0.35$, $v_{s1}=0.3$, $v_{s2}=0.1$, $k_d=40$, $d=0.05$)

сырья g и концевой классификатор, характеризуемый эффективностью выделения фракции B в готовый продукт. Качество готового продукта (степень переработки сырья) оценивается как:

$$R = \frac{q_{Be}^k}{q_{Be}^k + q_{Ac}^k}, \quad (27)$$

при $k \rightarrow \infty$ (стационарный режим), где выход фракций в готовый продукт рассчитывается по формуле (23).

Если за время Δt в ячейку подачи поступает больше сырья $G\Delta t$, чем может содержаться в этой ячейке, произойдет ее завал, то есть блокировка работы слоя. Поэтому для заданного расхода ожижающего агента существует предельная производительность подачи сырья g_{max} , при которой возможна устойчивая работа аппарата. Подача возврата в нижнюю ячейку представляющей аппарат цепи ограничивает предельную производительность, поскольку ее переполнение определяется двумя потоками частиц: задаваемой производительностью подачи и устанавливаемым в зависимости от эффективности классификатора потоком возврата. Вместе с тем, содержание фракций в ячейках снижается по высоте аппарата из-за неоднородности кипящего слоя. Поэтому появляется возможность повысить предельную производительность, подавая возврат не в нижнюю ячейку, а в более высокое сечение аппарата, например, в ячейку с номером m_2 (рис.8). Это может быть обосновано еще и тем, что в возврате исходная фракция A уже с значительной степени переработана, и для завершения процесса ей требуется меньшее время пребывания. Расчетная оценка этого подхода показана на рисунках 9-10. Из рисунков следует, что характер и степень влияния m_2 существенно зависят от эффективности классификатора E . С ростом m_2 величина предельной производительности заметно увеличивается при любых E (рисунок 10), но степень увеличения тем больше, чем ниже E . Изменение качества готового продукта с ростом m_2 (рисунок 9) происходит по-разному. При высокой эффективности классификатора оно монотонно снижается, но это снижение становится заметным только при $m_2 > 6$. При более низкой эффективности классификатора на кривых появляется максимум, то есть существует оптимальная позиция подвода возврата по качеству готового продукта. Естественно, что при изменении условий протекания процесса в слое представленные на рисунках 9-10 результаты будут меняться количественно, но могут быть пересчитаны с помощью разработанной модели.

Таким образом, оптимальное позиционирование подвода возврата по высоте аппарата является резервом повышения производительности системы ЦКС. Для практической реализации данного подхода разработана новая конструкция аппарата ЦКС, защищенная патентом на полезную модель.

В четвертой главе описаны результаты практического использования результатов диссертационного исследования. Разработанные средства программной реализации моделирования (программа для ЭВМ «Моделирование и расчет процессов в циркуляционном кипящем слое», номер государственной регистрации №2016662898, разработчики А.В. Митрофанов, А.А.Ф. Camelo, В.Е. Мизонов) были приняты к использованию на МУП «Спецавтотранс» (г.Череповец, Вологодская область). Непосредственно при участии автора диссертации указанный программный продукт был использован для расчетов при проведении всего комплекса работ, выполняемых в период проектирования и запуска пилотной установки ЦКС для сушки дробленых отходов термопластиков, работающей в составе технологической линии по переработке вторичного полиэтилентерафталата (ПЭТ).

Некоторые примеры описания работы установки с помощью предложенной программы представлены на рис. 11-12. В рамках технологического процесса переработки ПЭТ измельченный и вымытый продукт (флекс) имеет высокое влагосодержание, которое должно быть снижено для дальнейшего хранения и переработки. В зависимости от условий дальнейших технологических переделов требования к влагосодержанию флексы могут быть различными. Запущенная на предприятии сушилка ЦКС имела подъемную колонну высотой 2 м квадратного

поперечного сечения $0,3 \times 0,3$ м и в периодическом режиме обеспечивала производительность 60 кг/час по сухому продукту (с влажностью 0,02). Фиктивная скорость воздуха составляла 3 м/с, а температура на входе 40°C .

Для таких объектов сушки, как ПЭТ флексы, обезвоживание не может лимитироваться диффузией влаги внутри частиц, поэтому имеет место только первый период сушки. Незначительная нелинейность расчетной кинетической кривой на рис. 11 объясняется аксиальной неравномерностью распределения объемного содержания материала в подъемной колонне. Кроме того неравномерность распределения объемного содержания материала в подъемной колонне является нестационарной, что может быть проиллюстрировано рисунком 12.

Результаты моделирования показывают, что модель обеспечивает достаточную для инженерных задач прогнозирующую эффективность, и может быть рассмотрена в качестве достоверной основы для моделирования технологических процессов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложены математическая модель и метод расчета формирования потоков сыпучего материала в аппаратах с циркуляционным кипящим слоем, позволяющий учесть взаимное влияние параметров распределения частиц по высоте кипящего слоя и потока материала из контура возврата.

2. Показано, что одним из факторов, наиболее существенно влияющих на производительность аппаратов с периодическим циркуляционным кипящим слоем, является время задержки материала в контуре возврата. С ростом времени задержки производительность аппарата и интенсивность основного технологического процесса снижаются, что может стать лимитирующим фактором применения аппаратов с циркуляционным кипящим слоем.

3. Теоретически исследовано функционирование аппаратов с циркуляционным кипящим слоем непрерывного действия и показано, что с учетом распределения концентрации твердой фазы по высоте кипящего слоя существует оптимальное по высоте слоя положение подвода возврата материала из контура циркуляции, позволяющее повысить производительность без снижения качества целевого продукта.

4. На примере экспериментального исследования процесса сушки сыпучего материала в оригинальных лабораторных установках с периодическим циркуляционным кипящим слоем и подтверждена прогностическая эффективность предложенного метода расчета и выявлены преимущества сушки в циркуляционном кипящем слое.

5. Разработан компьютерный инженерный метод поверочного расчета режимных параметров теплообмена и формирования массопотоков сыпучего материала в сушилке с циркуляционным кипящим слоем, защищенный зарегистрированной программой для ЭВМ.

6. Разработаны новые конструкции аппаратов с циркуляционным кипящим слоем, в том числе, аппарат с возможностью позиционирования подвода возврата в кипящий слой, защищенные двумя патентами на полезные модели.

7. Средства программной поддержки моделирования и расчета режимных параметров

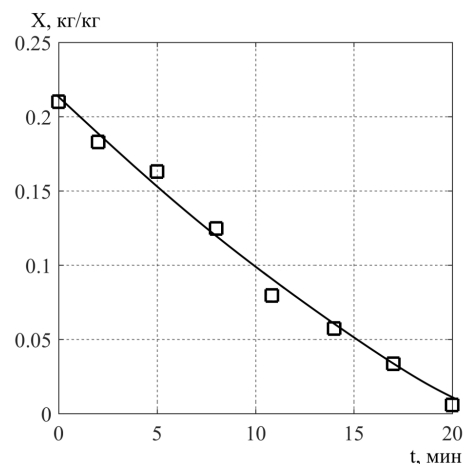


Рис. 11. Кинетика сушки ПЭТ флексы в пилотной установке ЦКС в периодическом режиме работы (точки – эксперимент, линия – расчет)

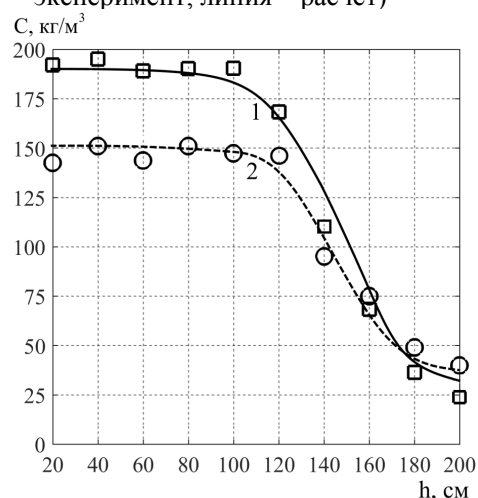


Рис. 12. Распределение концентрации твердой фазы по высоте подъемной колонны пилотной установки: 1 – распределение к моменту времени 2 мин от начала процесса (□ – эксперимент, линия – расчет); 2 – распределение к моменту времени 20 мин от начала процесса (○ – эксперимент, линия – расчет)

тепломассообмена и формирования массопотоков сыпучего материала в циркуляционном кипящем слое были применены на МУП «Спецавтотранс» (г.Череповец, Вологодская область) для проектирования и запуска пилотной установки для сушки дробленых отходов термопластиков в циркуляционном кипящем слое.

Перспективными направлениями развития данной темы являются анализ и оптимизация показателей устойчивости функционирования аппаратов ЦКС непрерывного действия с различной конструкцией тракта возврата, а также разработка новых конструкций аппаратов с ЦКС.

Основные публикации по теме диссертации

1. Mizonov, V. A simple model to estimate and compare efficiency of fluidized bed reactor without and with circulation / V. Mizonov, A. Mitrofanov, K. Tannous, **A. Camelo** // Изв. вузов. Химия и химич. технология.– 2019.–том 62.– № 3.– С. 83-88. (*Web of Science*)
2. Mitrofanov, A. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed / A. Mitrofanov, V. Mizonov, A. Camelo & K. Tannous // *Particulate Science and Technology*.– 2019. – Vol. 37. – No. 8. – P. 1028-1033. (*Web of Science*)
3. Mizonov, V. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed / V. Mizonov, A. Mitrofanov, **A. Camelo**, L. Ovchinnikov. // *Recent Innovations in Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 11.– N.1. – P. 20-28. (*Scopus*)
4. Mitrofanov, A.V. Theoretical study of the batch circulating fluidization / A.V. Mitrofanov, V.E. Mizonov, K. Tannous, **A. Camelo** // Изв. вузов. Химия и химич. технология.– Иваново.– 2016.– том 59.– № 11.– С. 92.– 99.
5. Митрофанов, А.В. Ячеечная модель гидродинамики реактора с циркуляционным кипящим слоем / А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, **A. Camelo**, K. Tannous // Вестник ИГЭУ. №4, 2016, с.19-24.
6. Митрофанов, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование тепловой обработки дисперсного топлива в аппарате с кипящим слоем / А.В. Митрофанов, Н.С. Шпейнова, **А.Ф. Камело**, А.В. Плаксин, С.А. Херувимов // Вестник ИГЭУ. – 2016.– Вып. 1.– С. 58.– 62.
7. Митрофанов, А.В. Разработка вероятностно-статистической модели свшки частиц биотоплива в кипящем слое инертного носителя / А.В. Митрофанов, Е.А. Шуина, **А.Ф. Камело**, Е.Р. Шумыло // Вестник ИГЭУ. – 2018. – №.3.– С. 57-64
8. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed. Proc. of the Int. symposium of reliable flow of particulate solids; “RELPOWFLO V”, 13th-15th June 2017, Skien, Norway, E-edition, Paper 3C1.
9. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Камело А.Ф., Шуина Е.А. Моделирование энергонапряженных процессов термической обработки продуктов растениеводства в аппаратах с циркуляционным кипящим слоем // «Сушка, хранение и переработка продуктов растениеводства: сборник научных трудов Межд. научно-технич. семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (22-23 мая 2018 года). / М.: Изд.-во «Перо». 2018. – С.108-110.
10. Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Camelo A., Tannous K. Влияние временной задержки в контуре циркуляции реактора с газодисперсной средой // Труды 18-й междунар. Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. 4–7 сент. 2018 г., Плес, РФ, С. 279-285.
11. В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, А. Camelo, Л.Н. Овчинников. Моделирование энерго-технологических процессов в циркуляционном кипящем слое // XIII Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование»: сборник тезисов/ Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2018. – С. 69-71.
12. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2016662898. Моделирование и расчет процессов в циркуляционном кипящем слое / Митрофанов А.В., Camelo А.А.Ф., Мизонов В.Е.; правооблад. ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 25.11.16.
13. Пат. на полезную модель 174232, Российская Федерация, В07В 1/40. Установка кипящего слоя [Текст] / Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Камело А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ивановский гос. энергетический университет; опубл. 09.10.2017 Бюл. № 28.
14. Пат. на полезную модель 174233, Российская Федерация, В07В 1/40. Установка циркуляционного кипящего слоя [Текст] / Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Камело А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ивановский гос. энергетический университет; опубл. 09.10.2017 Бюл. № 28.