

## Проект РФФИ 18-08-00028 А

### Новые методы моделирования, расчета и оптимизации энерготехнологических процессов в циркуляционном кипящем слое

Сроки выполнения 2018-2020

Финансирование – 700000/год

Руководитель – В.Е. Мизонов

Исполнители – А.В. Митрофанов, Е.А. Шуина

## СОДЕРЖАНИЕ ИТОГОВОГО ОТЧЕТА

**Аннотация, публикуемая на сайте РФФИ (кратко; описать содержание проведенных исследований и полученные результаты за весь срок реализации Проекта)**

Содержанием проведенных исследований была разработана разработка новых подходов к компьютерному моделированию, расчету и оптимизации процессов в циркуляционном кипящем слое как в системе с распределенными параметрами и обратными связями, а также в сопутствующих явлениях с участием дисперсных сред. Теоретической основой решения задач проекта является теория цепей Мракова. На ее основе разработано математическое, программно-алгоритмическое и эмпирическое обеспечение инженерных методов расчета и оптимизации энерготехнологических процессов в форсированном циркуляционном кипящем слое. В результате численных экспериментов с разработанными моделями показано, что в процессах периодического псевдооживления решающим фактором, определяющим эффективность переработки материала, является время его задержки в контуре циркуляции. Для процессов непрерывного циркуляционного псевдооживления поставлена и решена задача оптимального позиционирования подвода возврата из контура циркуляции по высоте кипящего слоя, что позволяет значительно повысить производительность процесса без потери качества переработки материала. Параметрическая идентификация и верификация разработанных моделей и методов расчета выполнена на специально разработанных лабораторных установках с кипящим слоем различной конфигурации. Основными процессами детального моделирования и верификации были сушка, гранулирование и пиролиз. Показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. В плане развития проблематики проекта предложены новые подходы для решения задач внутреннего нелинейного тепло- и массопереноса в частицах с учетом протекания в них фазовых переходов и/или химических реакций. Полученные результаты опубликованы в 31-й журнальной статье, из которых 11 – в журналах, индексируемых в Web of Science (Core Collection) и Scopus. Получены 2 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ и патент на полезную модель, сделано 9 докладов на конференциях международного уровня.

**Название Проекта (на англ. языке)**

New methods of modeling, calculation and optimization of energotechnological processes in circulating fluidized bed

**Аннотация, публикуемая на сайте РФФИ (на английском языке) (кратко; описать содержание проведенного исследования и полученные результаты за весь период реализации Проекта)**



The essence of the carried out investigation was the development of new approaches to computer modeling, calculation and optimization of the processes in a circulating fluidized bed as in a systems with distributed parameters and delayed feedbacks as well as in other processes with participation of particulate solids. The theory of Markov chains is used as the theoretical tool to solve the problems of the project. On its basis, the mathematical, computer, and empirical support of the engineering methods of calculation and optimization of energo-technological processes in a forced circulating fluidized bed is developed. The numerical experiments with the elaborated models showed that, in periodical processes of fluidization, the key factor forming the efficiency of a material treatment is the time delay of the material in a circulation loop. For the processes of continuous circulating fluidization, the problem of optimal positioning of the circulating flow input over the fluidized bed height was set up and solved. The input into the optimal position allows considerable improving the production capacity of the process without the loss in material treatment quality. Parametric identification and verification of the developed models and computational methods was done at specially elaborated lab scale fluidized bed apparatuses of different configuration. The basic processes of modeling and verification were drying, granulation and pyrolysis. The good correlation of computed and experimental data was found. In the scope of the project subject matter, the new approaches to solve the problems of internal non-linear heat- and mass transfer taking into account the phase transformation and/or chemical reactions are proposed.

The obtained results are published in 31 journal papers including 11 papers in the journals indexed Web of Science (Core Collection) and Scopus. Two certificates on the state registration of computer programs and one patent for a useful model are obtained, 9 presentations were done at conferences of international level.

**Цель и задачи фундаментального исследования (указать как в заявке)**



Целью проекта является разработка научных основ выявления резервов повышения производительности и энергоэффективности в аппаратах с форсированным и циркуляционным кипящим слоем и разработка технических решений, реализующих эти резервы на практике.

На верхнем уровне конкретных задач проекта стоит разработка единого подхода к моделированию и расчету взвесенесущих потоков в аппаратах с форсированным кипящим и циркулирующим кипящим слоем, базирующегося на единой методологической и алгоритмической основе, доступного для использования в инженерной практике. Для этой цели предлагается использовать математический аппарат дискретных моделей, основанных на теории цепей Маркова. Здесь же разрабатываются принципы постановки задач оптимального управления этими процессами как системами с распределенными параметрами.

Задачи следующего уровня состоят в адаптации разработанных моделей к конкретным процессам, осуществляемым в форсированном и циркуляционном псевдооживленном слое, в параметрической идентификации моделей и создании на их основе инженерных методов расчета.

Конкретная практически значимая задача, на решение которой направлена эта часть проекта, состоит в разработке и исследовании математической модели циркуляционного кипящего слоя с частицами, которые меняют свои свойства в результате протекающих в слое тепломассообменных (например, сушки) и химических (например, горения, газификации) процессов. Кроме того планируется

сравнение кинетики протекания этих процессов в плотном, кипящем и циркулирующем кипящем слое.

На основе разработанных и идентифицированных моделей будет выполнен поиск рациональных (оптимальных) режимных и конструктивных параметров функционирования циркуляционного кипящего слоя и выработаны практические рекомендации по совершенствованию топков кипящего слоя.

Для идентификации и верификации модели необходимо разработать и изготовить лабораторный стенд циркуляционного кипящего слоя, а также обобщить известные экспериментальные данные по коэффициентам переноса и кинетике реакций при различных режимах движения газозвеси.

## Важнейшие результаты, полученные при реализации Проекта



Интегральным результатом решения поставленных задач является разработанная универсальная математическая модель (и ее программно-алгоритмическое обеспечение), позволяющая с достаточной для инженерной практики точностью прогнозировать физико-химические процессы в установках с циркулирующим кипящим слоем и осуществлять их рациональное проектирование и эксплуатацию. Сюда же относится компьютерный инженерный метод расчета установок с циркулирующим кипящим слоем, основанный на предложенных математических моделях.

Конечные результаты, на наш взгляд, состоят из нескольких компонентов, которые могут быть рассмотрены как результаты, имеющие самостоятельное значение. Во-первых, это разработка самой универсальной математической модели на основе теории цепей Маркова, где процесс в кипящем слое рассматривается как объект с распределенными параметрами и меняющимися во время псевдооживления свойствами частиц из-за протекающих в них физико-химических процессов, что, на наш взгляд, выполнено впервые. На основе этих моделей в численных экспериментах были получены следующие нетривиальные результаты:

- технологические характеристики аппарата с периодическим циркуляционным кипящим слоем существенно зависят от времени задержки материала в контуре циркуляции. С его значительным ростом циркуляционный кипящий слой теряет преимущества перед кипящим слоем без циркуляции;

- в аппаратах с непрерывным циркуляционным кипящим слоем существует предельная производительность, до которой циркуляционный кипящий слой сохраняет устойчивое функционирование;

- эта предельная производительность может быть заметно увеличена путем оптимального позиционирования подвода возврата по высоте кипящего слоя. При этом степень переработки материала может незначительно снижаться или даже незначительно повышаться.

Во-вторых, это результаты приложения разработанных моделей и методов расчета к конкретным физико-химическим процессам в кипящем слое (сушка различных материалов, гранулирование, пиролиз), для идентификации и верификации которых использованы опытные данные, полученные на созданных в рамках проекта лабораторных установках, а также заимствованные данные, полученные научными партнерами исполнителей проекта. Это следующие результаты:

- новая критериальная зависимость для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления частиц в слое;

- новая зависимость для коэффициента макродиффузии частиц в слое;

- результаты расчетно-экспериментального сравнения кинетики сушки частиц в плотном слое, кипящем слое без и при наличии циркуляции. Показаны преимущества сушки в циркуляционном кипящем слое;

- новая модель гранулирования в кипящем слое и ее экспериментальная верификация;

- новые данные по кинетике пиролиза и его реализации в кипящем слое.

В третьих, это новый подход к моделированию внутренних процессов переноса в частицах, в частности, к моделированию нелинейной теплопроводности в многослойных средах с фазовыми переходами и химическими реакциями в слоях, рассматриваемый как научный задел к развитию спектра задач проекта.

### **Сопоставление результатов, полученных при реализации с мировым уровнем**



Значительная часть результатов проекта опубликована в соавторстве с учеными из признанных одними из мировых лидеров организаций. Это университет г. Кампинас, Бразилия, где под руководством проф. К. Tannous ведутся интенсивные работы по моделированию, расчету и экспериментальному исследованию топков с кипящим слоем для сжигания отходов сельскохозяйственной и лесной промышленности, востребованные национальной энергетикой. В 2015 г. под ее редакцией выпущена коллективная монография Innovative Solutions in Fluid-Particle Systems and Renewable Energy Management. Edited by K.Tannous, IGI Global, 2015, 397p. DOI: 10.4018/978-1-4666-8711-0, где собраны последние достижения в этой области учеными из Бразилии, Канады и США. (В.Е. Мизонов был членом редакционного совета монографии и рецензентом ряда глав).

Одним из признанных мировых лидеров в области моделирования и экспериментального исследования перемешивания частиц является Ecole des Mines d'Albi, Франция, руководитель исследовательской группы проф. Н. Berthiaux. Однако В.Е. Мизонов является неформальным членом этой группы, и многие результаты опубликованы совместно с Н. Berthiaux. Таким образом, полученные в проекте результаты не только сопоставимы с мировым научным уровнем, но и являются одной из его составляющих.

Отдельно необходимо отметить особенность подходов и результатов проекта. По проблематике кипящего слоя выходит много работ, но практически все они относятся к прямоточному кипящему слою, а моделирование остается на недостаточно глубоком уровне. В частности, влияние меняющихся свойств частиц на гидродинамику процессов фактически не исследуется.

При переходе к циркуляционному кипящему слою можно также наблюдать значительное число исследований, но практически все они касаются отдельных независимых процессов в собственно кипящем слое и в контуре циркуляции без учета их взаимного влияния друг на друга. Теоретических работ, в которых кипящий слой и контур циркуляции моделировались бы как единая система с взаимным влиянием характеристик ее элементов нами не найдено, что позволяет считать предпринятое в проекте исследование в определенной степени пионерским, позволившим получить неизвестные ранее нетривиальные результаты по особенностям процессов циркуляционного псевдоожигения.

### **Методы и подходы, использованные при реализации Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)**



Для реализации целей и задач проекта использованы методы математического моделирования, вычислительного эксперимента, параметрической идентификации, лабораторного эксперимента, критериального обобщения лабораторных и промышленных экспериментов, эвристического конструирования.

Основным подходом к описанию процессов в циркуляционном кипящем слое, определяющим его новизну, является переход от интегральных балансовых

уравнений для всего слоя к распределениям его физико-химических параметров по объему слоя и поиск возможностей управлять этими распределениями для повышения эффективности оборудования.

Для решения задач верхнего уровня, состоящих в разработке инновационных теоретических основ моделирования и расчета процессов в аппаратах с форсированным и циркулирующим кипящим слоем, использованы дискретные модели, построенные на основе теории цепей Маркова. Состояние процесса (рабочий объем, степень завершения химической реакции др.) разбивается на ячейки малого, но конечного размера, а текущее состояние процесса представляется набором характеристик этого состояния, организованного в вектор-столбец. Эволюция состояния фиксируется через малые конечные промежутки времени и описывается матрицами переходных вероятностей, которым ставятся в соответствие характеристики переноса описываемых моделью физических свойств. Вероятности перехода из одной ячейки фазового пространства в другие рассчитываются на основе физико-химических уравнений и, таким образом, описывается эволюция состояния всего процесса с учетом взаимного влияния одних параметров на другие. Конкретная структура матрицы переходных вероятностей, как и численные значения входящих в нее переходных вероятностей, определяется текущими условиями протекания процесса, что делает разрабатываемые модели нелинейными, что также обладает новизной.

Каждый последующий вектор состояния получается из предыдущего путем умножения матрицы переходных вероятностей на текущий вектор состояния вплоть до достижения установившегося состояния. На каждом рекуррентном шаге вектор состояния может быть дополнительно скорректирован путем добавления к нему суммы векторов источников или вычитанием вектора стоков, если этого требует конкретный процесс. Ряд моделей включает в себя несколько параллельных цепей, между сходственными ячейками которых возможен обмен некоторыми потоками (например, при описании межфазного теплообмена одна цепь описывает миграции частиц, другая – продвижение оживающего агента вдоль соответствующей цепи, между сходственными ячейками цепей происходит передача теплоты). Включение в моделирование параллельных цепей обладает новизной (по крайней мере, в исследуемой области).

При решении выделенных задач следующего уровня рассмотрена адаптация разработанной стратегии к типовым процессам химической технологии и топливной энергетики (сушке, гранулированию, пиролизу) путем выбора определяющих координат фазового пространства, параметрической идентификации и верификации разработанных моделей сначала в лабораторных, а затем в промышленных установках. Здесь использованы методы экспериментального исследования в соответствие с нормативными методиками их проведения, методы параметрической идентификации и методы критериального обобщения полученных данных. Результаты решения оптимизационных задач используются в разработке новых конструкций оборудования методами эвристического конструирования.

### **Апробация результатов реализации Проекта на научных мероприятиях (участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который был предоставлен грант)**

- «Сушка, хранение и переработка продуктов растениеводства», Международный научно-технический семинар, посвященный 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева, Москва, 22-23 мая 2018 года), Митрофанов А.В. Моделирование энергонапряженных процессов термической обработки продуктов растениеводства в аппаратах с циркуляционным кипящим слоем, секционный

- 18-ая международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. 4–7 сентября 2018 г., Плес, Россия, Мизонов В.Е. Модель седиментации дисперсного материала при действии нестационарной массовой силы, секционный.
- 18-ая международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. 4–7 сентября 2018 г., Плес, Россия, Митрофанов А.В. Влияние временной задержки в контуре циркуляции реактора с газодисперсной средой, секционный.
- XIII Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование»: сборник тезисов/ Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2018, Е.А. Шуина. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ, секционный.
- XIII Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование/Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2018, В.Е. Мизонов, МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ, пленарный.
- XIII Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование»: сборник тезисов/ Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2018, Мизонов В.Е. ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕПЕЙ МАРКОВА С НЕПРЕРЫВНЫМ ВРЕМЕНЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ, секционный.
- Международная (XX Всероссийская) научно-техническая конференция «СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ» (Бенардосовские чтения), 29–31 мая, 2019, Иваново, В.Е. Мизонов. Процессы смешивания в технологии переработки дисперсных материалов, ключевой на секции.
- Международный научно-технический симпозиум «Вторые международные косыгинские чтения «Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование». Москва. 29 октября – 1 ноября, 2019, Мизонов В.Е. Смешивание сыпучих материалов: от математического моделирования к новым конструкциям смесителей, пленарный.
- 19-ая международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. 8 - 11 сентября 2020 г., Плес, Митрофанов А.В. Нелинейные теплофизические процессы в сферической частице при фазовых переходах и химических реакциях, секционный.

**Краткое назначение конечной продукции, технологии или услуг, которые будут производиться с применением полученных результатов**

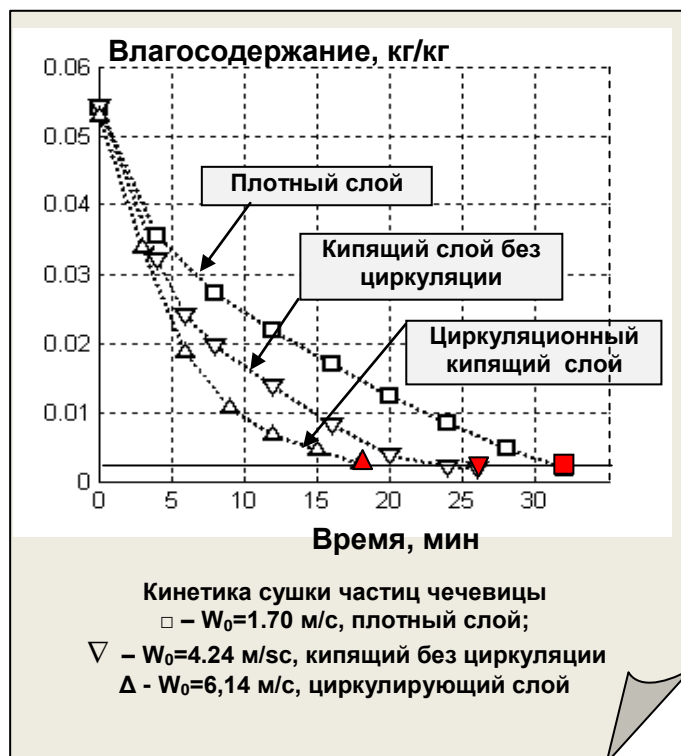
Конечной продукцией является программно-алгоритмическое и эмпирическое обеспечение расчета и оптимизации процессов в циркуляционном кипящем слое для проектирования нового и модернизации существующего оборудования, а также разработки режимных карт его эксплуатации. Кроме того, к внедрению рекомендуется новая конструкция аппарата с кипящим слоем.

## Краткий обзор научных результатов, полученных в результате выполнения проекта

### Сравнение кинетики сушки модельного материала во взвешенном слое при различных условиях организации процесса

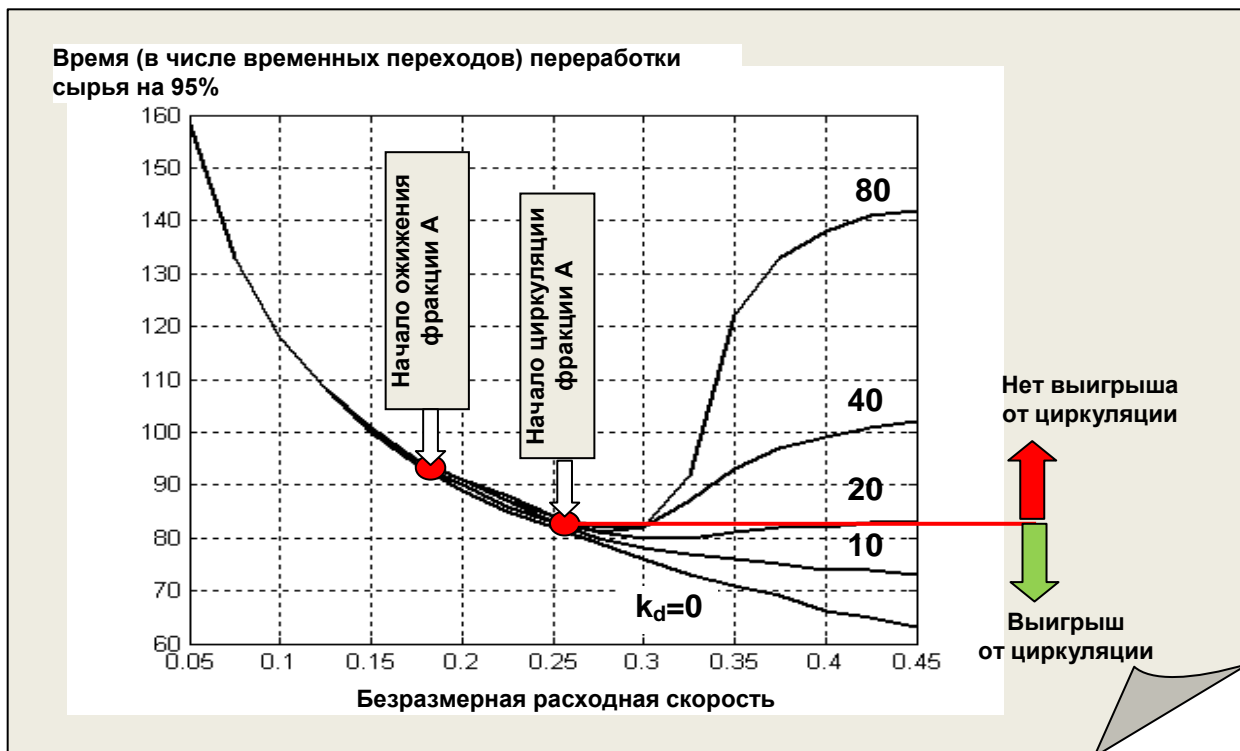


Лабораторная установка с циркуляционным кипящим слоем



Кинетика сушки навески чечевицы при различных фиктивных скоростях сушильного агента: 1,70 м/с – плотный слой, 4,24 м/с – кипящий слой (без циркуляции) и 6,14 м/с – ЦКС. Горизонтальная линия на графике соответствует 95%-му удалению влаги. Визуальное наблюдение за частицами в зоне циркуляции позволило считать, что время задержки в ней практически равно нулю. Из графиков видно, что увеличение скорости газа и переход к режиму с циркуляцией позволяет значительно сократить время высушивания. Линии – расчет, маркеры – эксперимент.

## Влияние расходной скорости газа на продолжительность переработки частиц в периодическом процессе на 95% при различных режимах псевдооживления

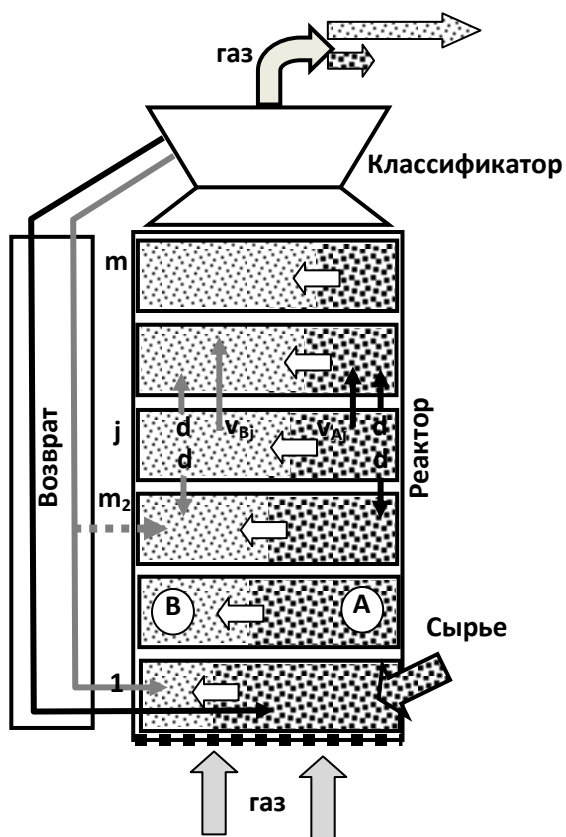


На рисунке показана продолжительность процесса, при которой фракция сырья А превращается во фракцию готового продукта В на 95%, в зависимости от безразмерной расходной скорости газа при различных временах задержки в контуре циркуляции. При малых скоростях превращение идет в плотном слое, и скорость превращения растет с ростом скорости газа благодаря интенсификации процессов переноса между частицами и газом. Начиная с некоторой скорости, наступает псевдооживление фракции А, но циркуляция еще не наступает. Здесь также скорость превращения монотонно возрастает с ростом скорости газа.

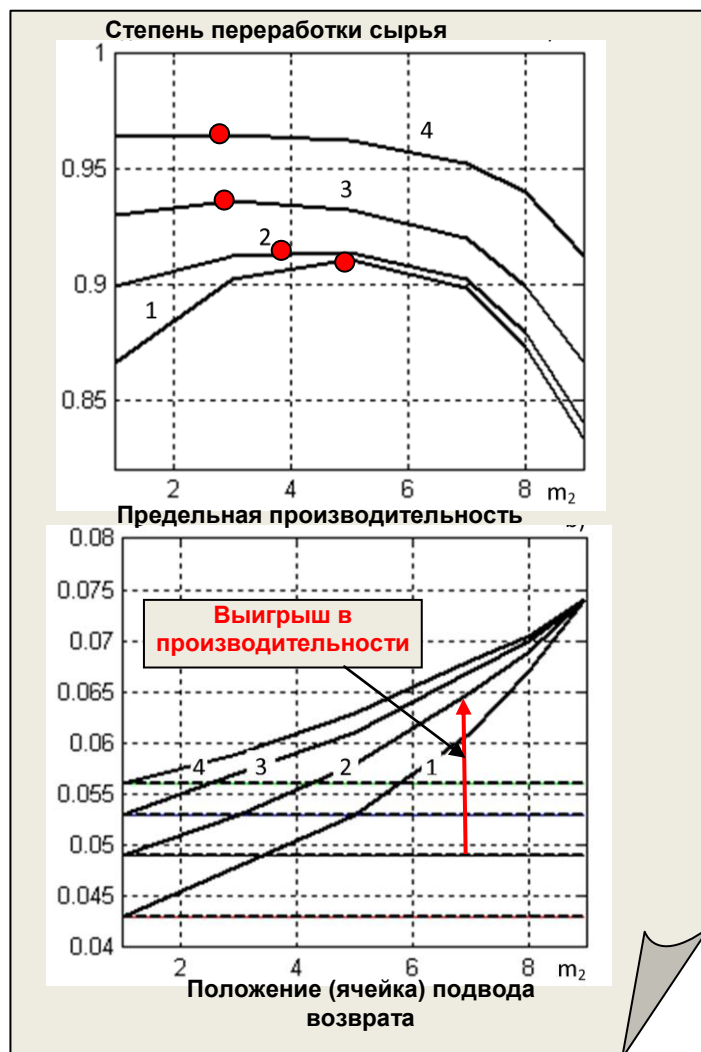
После скорости газа, соответствующей началу циркуляции, поведение кривой существенно зависит от времени задержки в контуре циркуляции. При малых временах скорость превращения продолжает возрастать с ростом скорости газа, но уже, начиная с  $k_d=20$ , возрастание сменяется убыванием, тем более существенным,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



## Оптимальное позиционирование подвода возврата в непрерывном циркуляционном кипящем слое



Расчетная схема модели.  
 E - критерий Ханкока-Луйкена  
 эффективности классификатора:  
 1 – E=0; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 0,75



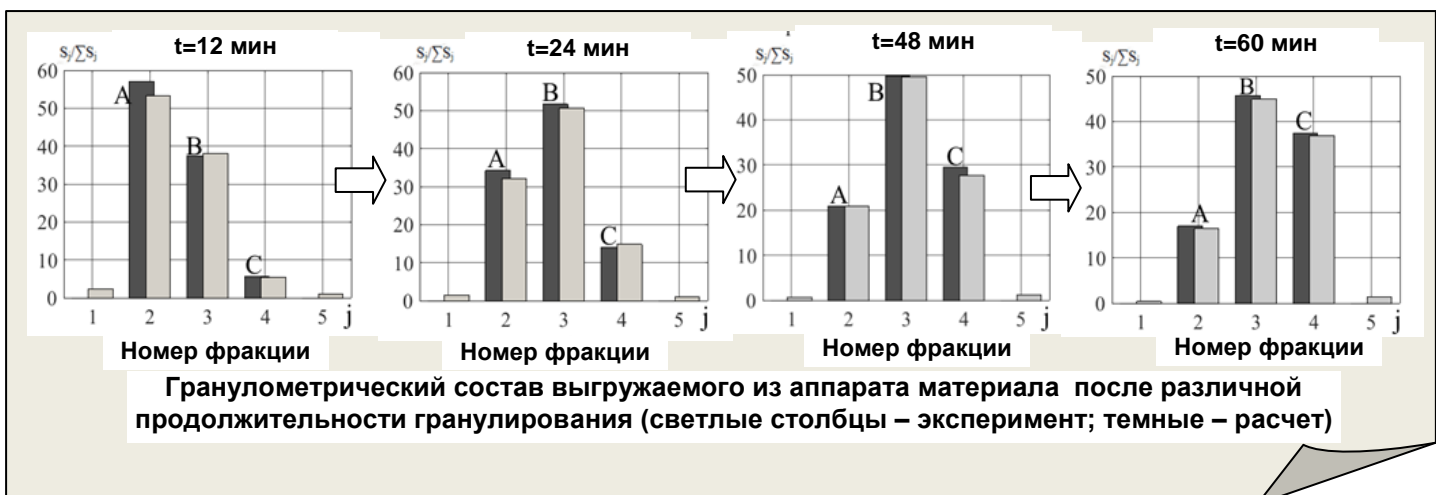
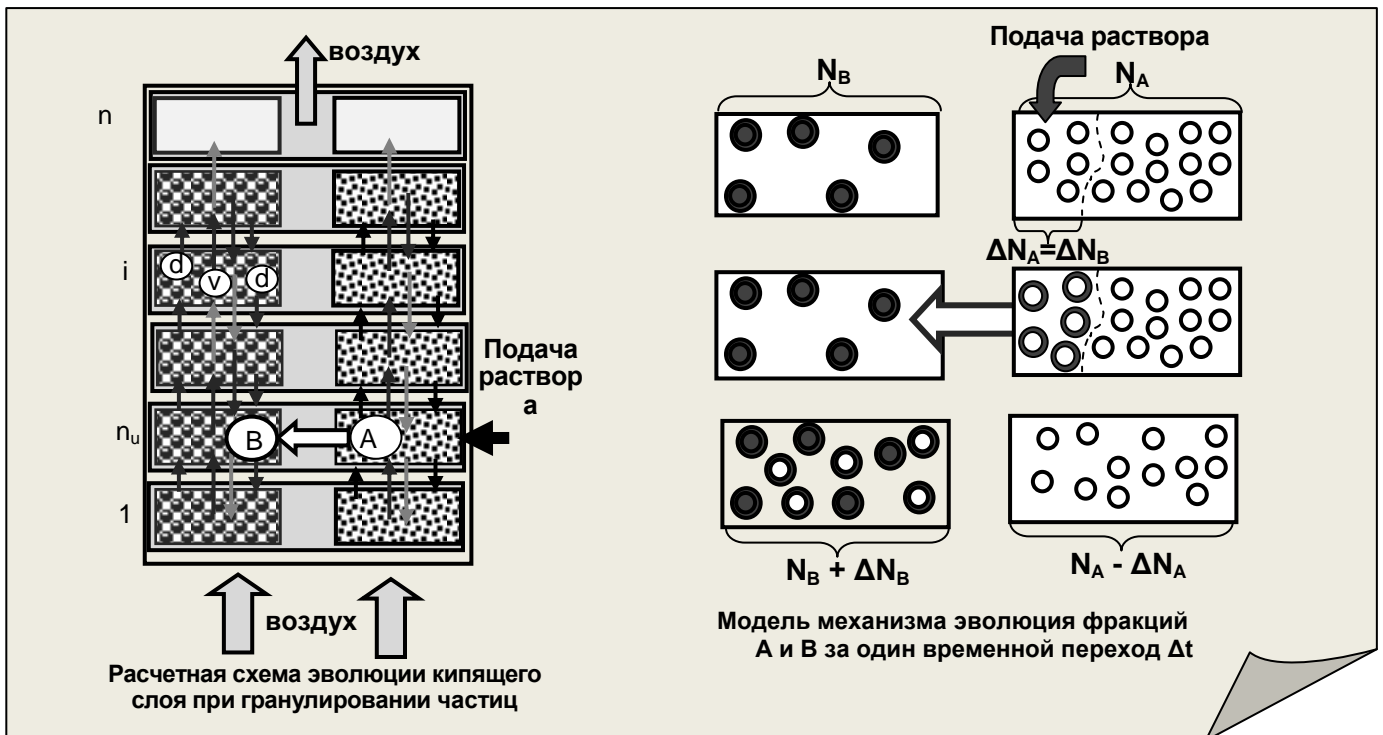
Подача возврата в нижнюю ячейку представляющей аппарат цепи ограничивает предельную производительность, поскольку ее переполнение определяется двумя потоками частиц: задаваемой производительностью подачи и устанавливающимся в зависимости от эффективности классификатора потоком возврата. Вместе с тем, содержание фракций в ячейках снижается по высоте аппарата в результате кипения слоя. Поэтому появляется возможность повысить предельную производительность, подавая возврат не в нижнюю ячейку, а в более высокое сечение аппарата, например, в ячейку с номером  $m_2$ . Расчетная оценка этого подхода показана на рисунке справа. Из рисунка 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, но степень увеличения тем больше, чем ниже E.

Изменение качества готового продукта с ростом  $m_2$  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 эти 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.

## Расчетно-экспериментальное исследование процесса гранулирования в кипящем слое

Миграции частиц в кипящем слое описана базовой моделью слоя, а переход из фракции во фракцию при подаче раствора описан моделью, показанной на рисунке справа.



## Расчетно-экспериментальное исследование процесса пиролиза древесины в аппарате периодического действия

Разработана одномерная численная модель нестационарного процесса конверсии биомассы (тепломассообмена, совмещенного с реакционной моделью Аврами – Ерофеева) в цилиндрическом реакторе. Получены предварительные экспериментальные данные о протекании процесса. Расчетные прогнозы и экспериментальные данные показали хорошее соответствие, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

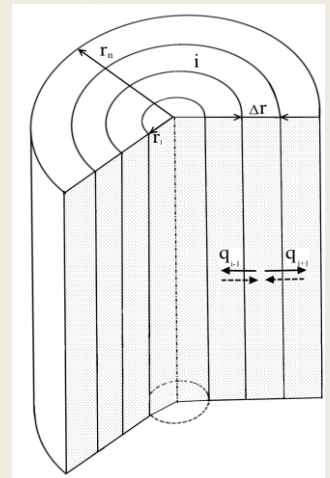
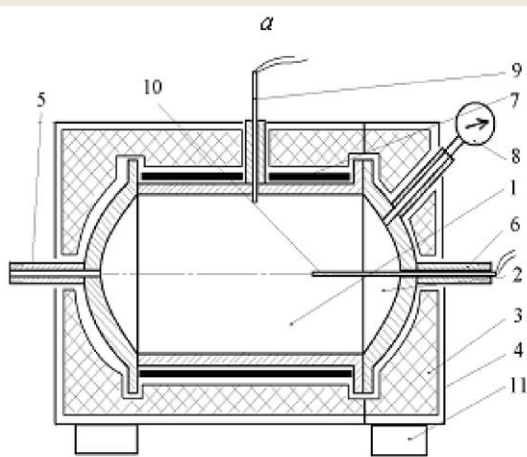
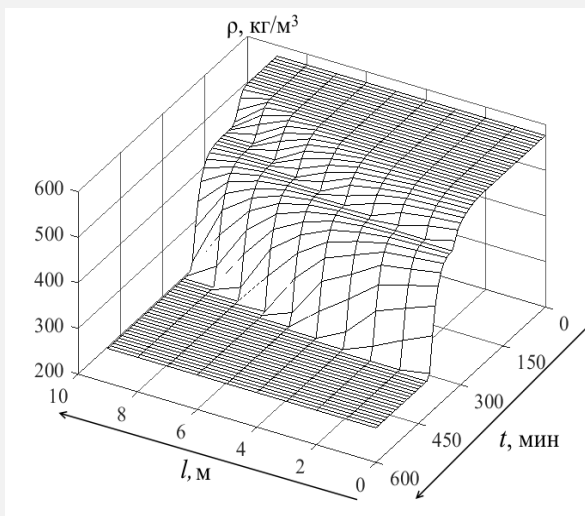
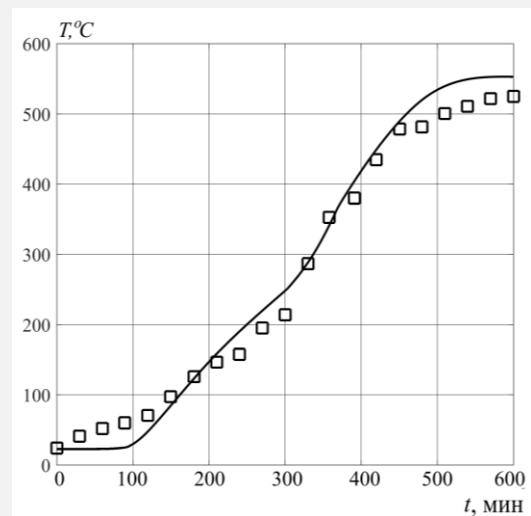


Схема (а) и общий вид (б) лабораторного реактора:  
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – теплоизоляция;  
 4 – кожух; 5, 6 – штуцера; 7 – электрический нагреватель;  
 8 – манометр; 9, 10 – термопары; 11 – опорные стойки

Расчетная схема моделирования радиального переноса теплоты



Расчетное изменение плотности (с учетом влажности) материала в пространстве реактора



Расчетно-экспериментальные данные изменения температуры в первой (осевой) ячейке