

На правах рукописи

Иванов Виталий Евгеньевич

СУШКА ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СУШИЛКЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иваново - 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук

Натареев Сергей Валентинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Сафин Руслан Рушанович

доктор технических наук

Волынский Владимир Юльевич

Ведущая организация:

ООО «Научно технический центр «Промышленная энергетика», г. Иваново.

Защита состоится « __ » _____ 2010 г. в __ часов в ауд. Г - на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.063.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный химико-технологический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, проспект Ф.Энгельса, д. 7.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, проспект Ф. Энгельса, 10.

Автореферат разослан « __ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь

совета Д 212.063.05

д. ф.-м. н.

Зуева Г.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В химической промышленности сушка наряду с выпариванием и обжигом, как правило, определяет технико-экономические показатели всего производства в целом, что связано со значительными затратами тепловой энергии для проведения данных процессов. Процессы конвективной сушки широко применяются в производствах минеральных солей и удобрений, полимерных материалов и в других производствах.

Для сушки дисперсных материалов успешно используются сушилки с кипящим слоем, неоспоримым преимуществом которых по сравнению с другими сушилками является развитая поверхность контакта между частицами и сушильным агентом и интенсивное испарение влаги из материала. Наблюдаемая при этом значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его средней величины, может быть устранена путем секционирования сплошного кипящего слоя. Создание и внедрение в промышленное производство аппаратов такой конструкции, позволяющих повысить эффективность процесса сушки и снизить удельные затраты тепловой энергии на единицу выпускаемой продукции, является актуальной задачей. Решение этой проблемы невозможно без дальнейшего совершенствования теоретической базы математического моделирования и методов расчета, основанных на исследовании равновесных и кинетических закономерностей массо- и теплообмена между высушиваемым материалом и сушильным агентом, а также гидродинамических особенностей движения твердой и газовой фаз в аппарате. Поэтому разработка таких моделей является актуальной задачей, имеющей важное теоретическое и практическое значение.

Цель работы. Разработка математической модели и инженерного метода расчета процессов тепломассопереноса в многосекционной сушилке кипящего слоя, позволяющих определить основные размеры аппарата при минимальном расходе тепловой энергии и достижении заданной конечной влажности дисперсного материала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка математического описания тепломассопереноса при сушке кварцевого песка и золы ТЭЦ;
- экспериментальное исследование процессов сушки кварцевого песка и золы ТЭЦ в аппарате кипящего слоя с вертикальными секционирующими перегородками;
- разработка инженерного метода расчета многосекционной сушилки кипящего слоя;
- разработка рекомендаций для использования результатов исследования в производстве керамического кирпича.

Научная новизна работы:

1. Разработаны математические модели процессов тепломассопереноса в многосекционной сушилке кипящего слоя, учитывающие нелинейность

равновесной зависимости, закономерности тепломассопереноса в периоды постоянной и падающей скорости сушки, а также особенности движения твердой и газовой фаз в аппарате.

2. Показано удовлетворительное совпадение изотерм десорбции воды с поверхности кварцевого песка и золы ТЭЦ, найденные по методу Пасса и рассчитанные с помощью уравнения Брунауэра, Эммета, Тейлора (БЭТ) в интервале относительной влажности воздуха от 0 до 35 %.

3. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлено возрастание объемного расхода рециркулируемого отработанного сушильного агента с увеличением количества секций в многосекционной сушилке.

Практическая ценность работы:

1. Предложена конструкция многосекционной сушилки кипящего слоя, позволяющая повысить равномерность сушки дисперсного материала, защищенная патентом на полезную модель.

2. Разработан инженерный метод расчета сушилки кипящего слоя с секционирующими вертикальными перегородками, позволяющий рассчитать габаритные размеры аппарата, влагосодержания и температуры материала, а также сушильного агента в каждой секции и на выходе из аппарата.

3. Найден режимные параметры работы многосекционной сушилки кипящего слоя, позволяющие получить готовый продукт с более однородным влагосодержанием по сравнению с односекционной сушилкой при одинаковом среднем времени пребывания материала в аппаратах.

4. На основе экспериментальных и теоретических исследований процесса сушки золы ТЭЦ и кварцевого песка в многосекционной сушилке кипящего слоя показана целесообразность повторного использования из последних секций аппарата не менее 25 % отработанного воздуха от общего расхода теплоносителя.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке и проектировании сушилки кипящего слоя для сушки кварцевого песка и золы ТЭЦ в производстве керамического кирпича.

На защиту выносятся:

1. Математическую модель процесса сушки дисперсного материала в многосекционном аппарате кипящего слоя;

2. Результаты экспериментальных исследований процесса сушки кварцевого песка и золы ТЭЦ в многосекционном аппарате кипящего слоя.

3. Результаты численного эксперимента по моделированию тепломассопереноса при сушке кварцевого песка и золы ТЭЦ.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Иваново, 2006); VI Региональной студенческой научной конференции “Фундаментальные науки – специалисту нового века” (Иваново, 2006); XIX

Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-19” (Воронеж, 2006); XI Международной научно-технической конференции “Наукоемкие химические технологии - 2006” (Самара, 2006); Всероссийской научно-технической конференции “Приоритетные направления развития науки и техники” (Тула, 2006); Международной научной конференции “Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием” (Иваново, 2007); XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (Томск, 2007); XXI Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21” (Ярославль, 2007); Региональной научно-технической конференции “Материаловедение и надежность триботехнических систем” (Иваново, 2009); XXII Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22” (Псков, 2007); III Международной научно-технической конференции “Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности” (Воронеж, 2009).

Публикации.

По материалам исследований опубликовано 16 печатных работ, в том числе 1 статья в журнале, входящем в список ВАК, получен патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем работы: 120 страниц основного текста, включая 50 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследований, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен анализ физических и математических моделей процесса термической сушки влажных материалов, представлены современные конструкции конвективных сушилок и инженерные методики их расчета. На основании анализа опубликованных данных сформулированы конкретные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процессов массо- и теплопереноса в многосекционном аппарате кипящего слоя (рис. 1), на которую получен патент на полезную модель. Сушилка кипящего слоя представляет собой аппарат конической формы, разделенный газораспределительной решеткой 3 на камеру 1 для кипящего дисперсного материала и камеру 2 для ввода сушильного агента. Аппарат разделен вертикальными перегородками 4 и 5 на секции. Все секции кроме последней снабжены переточными трубками 6, а все секции кроме первой снабжены

карманами 7 и инжектирующими трубками 8. Сушильный агент подается одновременно в нижнюю часть сушилки во все секции аппарата через штуцера 10. Высушиваемый материал подается через штуцер 9 сначала в первую секцию аппарата, в которой из материала частично удаляется влага, а затем материал направляется с помощью переточного устройства во вторую секцию аппарата и последовательно в остальные секции. Высушенный материал выводится из последней секции аппарата через трубу 11. Для улучшения перемещения материала из секции в секцию в нижней части переточной трубки 6 расположена инжектирующая трубка 8 и карман 7, из которого влажный материал с помощью струи воздуха выбрасывается в кипящий слой. Высота кипящего слоя в секции аппарата определяется высотой переточной трубки 6 над газораспределительной решеткой 3. Благодаря конической форме аппарата снижается скорость сушильного агента по мере его подъема, что позволяет проводить сушку полидисперсного материала, улучшить распределение частиц по крупности и уменьшить унос пыли. Более мелкие частицы поднимаются выше и находятся в области более низких температур. Отработанный теплоноситель удаляется в верхней части аппарата через штуцер 12.

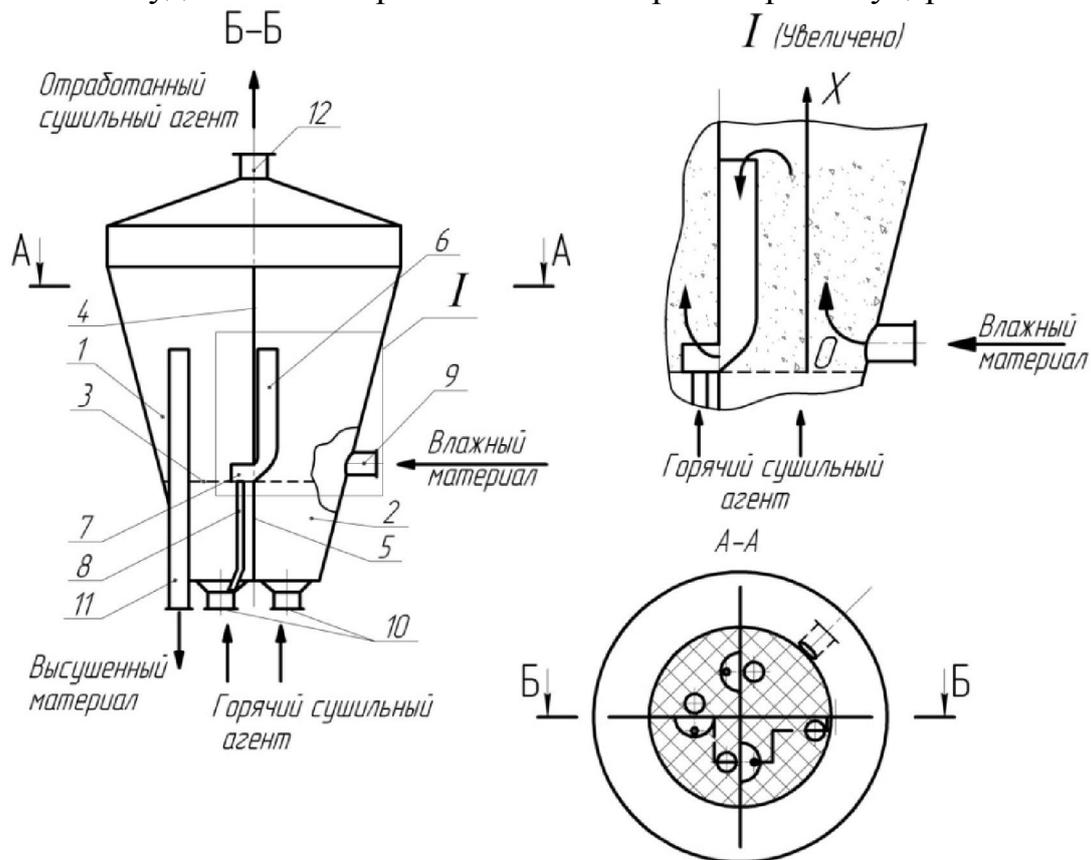


Рис. 1. Схема работы аппарата с кипящим слоем:

1 – камера для кипящего дисперсного материала; 2 – камера ввода сушильного агента; 3 – газораспределительная решетка; 4, 5 – вертикальные перегородки; 6 – переточная трубка, 7 – карман, 8 – инжектирующая трубка, 9 – штуцер для ввода дисперсного материала, 10 – штуцер для ввода сушильного агента, 11 – труба для вывода высушенного дисперсного материала, 12 – штуцер для вывода отработанного сушильного агента.

При разработке математического описания процесса сушки в многосекционном аппарате кипящего слоя были приняты следующие допущения. Процесс сушки имеет два периода: период постоянной скорости сушки (I период) и период падающей скорости сушки (II период). В период постоянной скорости сушки все тепло, подводимое к материалу, затрачивается на испарение влаги с поверхности материала. Температура материала остается постоянной и равна температуре мокрого термометра. Скорость сушки в этот период лимитируется скоростью испарения влаги с поверхности частицы. В период падающей скорости сушки перенос влаги в частице материала лимитируется как внешней, так и внутренней диффузией, а перенос теплоты определяется как внешним, так и внутренним теплообменом. Равновесие в системе сушильный агент - влажный материал описывается начальным участком изотермы БЭТ. Движение сплошной фазы описывается однопараметрической диффузионной моделью, учитывающей изменение скорости потоков по высоте аппарата, а движение дисперсной – моделью идеального перемешивания.

Математическая формулировка задачи массообмена между сушильным агентом и высушиваемым материалом включает следующие уравнения:

первый период сушки:

уравнение материального баланса по газовой фазе:

$$\varepsilon D_{\Gamma} \frac{d}{dz} \left(F \frac{dx_{\Gamma}}{dz} \right) - \varepsilon L \frac{dx_{\Gamma}}{dz} - (1 - \varepsilon) FN = 0, \quad (1)$$

уравнение для скорости сушки в первый период:

$$-\frac{du_{\text{cp}}}{d\tau} = N, \quad (2)$$

начальные и граничные условия:

$$x_{\Gamma}|_{z=0} = x_{\Gamma, \text{вх.}}, \quad (3) \quad \frac{dx_{\Gamma}}{dz}|_{z=H} = 0, \quad (4) \quad u_{\text{cp}}|_{\tau=0} = u_{\text{вх.}}, \quad (5)$$

функция распределения времени пребывания частиц в секции аппарата:

$$f(\tau) = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}, \quad (6)$$

уравнение для расчета влагосодержания вещества на выходе из секции аппарата:

$$u_{\text{вых}} = \int_0^{\tau_{\text{кр}}} u_{\text{cp}}(\tau) f(\tau) d\tau. \quad (7)$$

второй период сушки:

уравнение материального баланса по газовой фазе:

$$\varepsilon D_{\Gamma} \frac{d}{dz} \left(F \frac{dx_{\Gamma}}{dz} \right) - \varepsilon L \frac{dx_{\Gamma}}{dz} + (1 - \varepsilon) FK_x (x_{\text{нас}} - x_{\Gamma}) = 0, \quad (8)$$

уравнение кривой скорости сушки для второго периода:

$$-\frac{du_{cp}}{d\tau} = K_M (u_{cp} - u_p), \quad (9)$$

уравнение равновесия:

$$u_p = \frac{u_m k \varphi}{(1 - \varphi)[1 + (k - 1)\varphi]}, \quad (10)$$

граничные условия (3),(4) и начальное условие:

$$u_{cp}|_{\tau=0} = u_{кр}, \quad (11)$$

уравнение для расчета влагосодержания вещества на выходе из аппарата:

$$u_{вых} = \int_{\tau_{кр}}^{\infty} u_{cp}(\tau) f(\tau) d\tau, \quad (12)$$

где величины K_M и K_X связаны зависимостью: $K_M = K_X/m$, F – площадь поперечного сечения аппарата на расстоянии z от газораспределительной решетки, рассчитываемая по формуле: $F = \pi \left(R_p + z \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right)$.

Математическая формулировка задачи теплообмена между сушильным агентом и дисперсным материалом включает следующие уравнения:

первый период сушки:

уравнение теплового баланса по газовой фазе:

$$\begin{aligned} & \varepsilon(c_{\Gamma} + c_{в.п} x_{\Gamma}) \rho_{\Gamma} D_{\Gamma} \frac{d}{dz} \left(F \frac{dt_{\Gamma}}{dz} \right) - \varepsilon(c_{\Gamma} + c_{в.п} x_{\Gamma}) \rho_{\Gamma} L \frac{dt_{\Gamma}}{dz} - \\ & - (1 - \varepsilon) \alpha a_0 F [t_{\Gamma}(z) - t_{м.т}] - \varepsilon r^* \rho_{\Gamma} F N - K_{о.с} \Pi_{ап} [t_{\Gamma}(z) - t_{о.с}] = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

граничные условия:

$$t_{\Gamma}|_{z=0} = t_{\Gamma.вх.}, \quad (14), \quad \frac{dt_{\Gamma}}{dz}|_{z=H} = 0, \quad (15)$$

второй период сушки:

уравнение теплового баланса по газовой фазе:

$$\begin{aligned} & \varepsilon(c_{\Gamma} + c_{в.п} x_{\Gamma}) \rho_{\Gamma} D_{\Gamma} \frac{d}{dz} \left(F \frac{dt_{\Gamma}}{dz} \right) - \varepsilon(c_{\Gamma} + c_{в.п} x_{\Gamma}) \rho_{\Gamma} L \frac{dt_{\Gamma}}{dz} - \\ & - (1 - \varepsilon) \alpha a_0 F [t_{\Gamma}(z) - t_{вх}] - K_{о.с} \Pi_{ап} [t_{\Gamma}(z) - t_{о.с}] = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

граничные условия:

$$t_{\Gamma}|_{z=0} = t_{вх}, \quad (17), \quad \frac{dt_{\Gamma}}{dz}|_{z=H} = 0, \quad (18)$$

уравнение теплового баланса:

$$G_{\Gamma} [(c_{\Gamma} + c_{\text{в.п}} x_{\Gamma, \text{вх}}) t_{\Gamma, \text{вх}} + x_{\Gamma, \text{вх}} r^*] + G_{\text{с.м}} c_{\text{ж}} t_{\text{вх}} (u_{\text{вх}} - u_{\text{вых}}) + G_{\text{с.м}} c_{\text{с.м}} t_{\text{вх}} = \\ = G_{\Gamma} [(c_{\Gamma} + c_{\text{в.п}} x_{\Gamma, \text{вых}}) t_{\Gamma, \text{вых}} + x_{\Gamma, \text{вых}} r^*] + G_{\text{с.м}} c_{\text{с.м}} t_{\text{вых}} + Q_{\text{п}}, \quad (19)$$

где $\Pi_{\text{ап}}$ – периметр аппарата на расстоянии z от газораспределительной решетки.

В каждой секции аппарата предполагается линейность равновесной зависимости и постоянство кинетических параметров процесса. С учетом этого допущения решение вышеуказанных задач было выполнено с помощью ряда Тейлора, которое приведено в тексте диссертации. Решение общей задачи массо- теплопереноса получаем в результате сопряжения решений для всех секций сушилки. Разработанные математические модели были использованы для создания инженерной методики расчета многосекционного аппарата кипящего слоя.

В третьей главе с помощью метода Пасса получены изотермы десорбции паров воды с поверхности кварцевого песка и золы ТЭЦ и установлено, что в интервале относительной влажности воздуха от 0 до 35 % изотермы десорбции удовлетворительно описываются уравнением полимолекулярной адсорбции БЭТ.

Дано описание лабораторной установки для сушки дисперсных материалов (рис. 2). Установка работает следующим образом. Воздух с помощью воздуходувки 1 подается в электрокалорифер 3, где нагревается до заданной температуры. Из электрокалорифера горячий воздух направляется в аппарат с кипящим слоем дисперсного материала 4. Расход воздуха в сушилку устанавливается и контролируется с помощью ротаметра 2. Влажный материал подается шнековым дозатором 5, а высушенный материал удаляется из аппарата через патрубок 6, расположенный над газораспределительной решеткой. Отработанный теплоноситель выходит через верхний штуцер аппарата и очищается в циклоне 7.

Основным элементом данной установки является многосекционный аппарат с кипящим слоем с вертикальными перегородками. Данный аппарат был изготовлен из металла, теплоизолирован листовым асбестом толщиной 10 мм и имел следующие размеры: диаметр газораспределительной решетки – 80 мм, высота аппарата – 600 мм, конусность обечайки – 14° .

В качестве объекта исследования были выбраны золы ТЭЦ и кварцевый песок. Эксперименты проводили с вертикальными перегородками и без них при следующих условиях: производительность сушилки по высушенному материалу $G_{\text{с.м}}$ принималась $7 \cdot 10^{-4}$ кг/с, производительность сушилки по воздуху L изменялась в интервале от 0,011 до 0,015 м³/с, начальная влажность кварцевого песка составляла $8 \div 15$ %, начальная влажность золы ТЭЦ – $15 \div 25$ %, температура теплоносителя на входе в аппарат $t_{\text{вх}}$ изменялась в интервале от 40 до 90 °С. При проведении опытов измеряли температуры воздуха на входе в

аппарат и по высоте аппарата, начальную и конечную влажность исследуемого материала, а также влажность материала в каждой секции аппарата. Все измерения проводили после выхода аппарата кипящего слоя на стационарный режим, который устанавливался, как правило, через 2 часа.

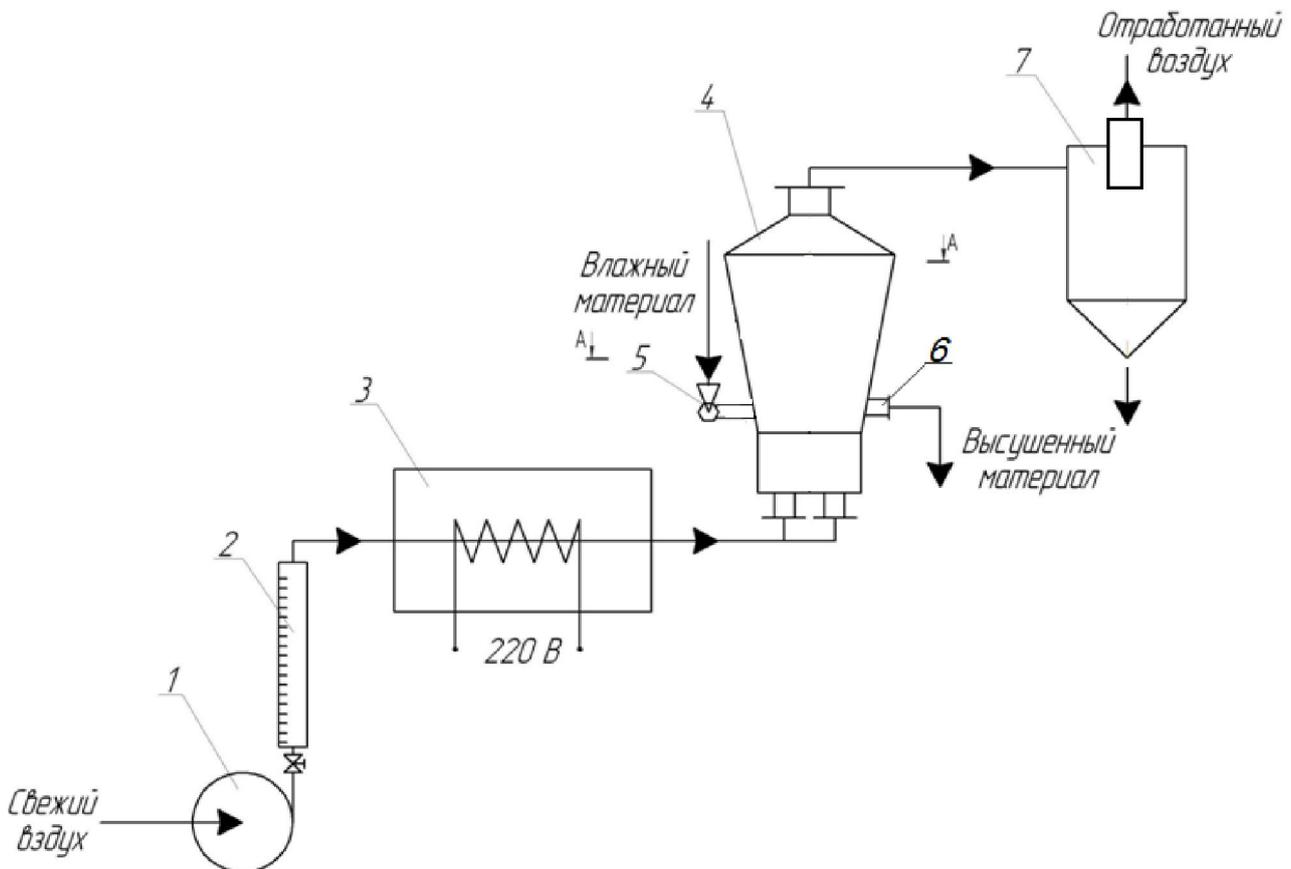


Рис. 2. Схема лабораторной установки для сушки дисперсных материалов: 1 – воздуходувка, 2 – ротаметр, 3 – электрокалорифер, 4 – аппарат с кипящим слоем, 5 – шнековый дозатор, 6 – труба для выгрузки материала, 7 – циклон.

На рис. 3 и 4 приведены экспериментально найденные зависимости изменения конечного значения влагосодержания золы ТЭЦ и кварцевого песка от расхода и температуры сушильного агента.

Анализ данных кривых показывает, что с увеличением расхода и температуры сушильного агента, конечная влажность высушиваемого материала уменьшается. Увеличение количества секций в аппарате позволяет получить высушенный материал с однородной влажностью. Установлено, что при одинаковых условиях проведения процесса конечная влажность золы ТЭЦ в аппарате с четырьмя перегородками в среднем в 1,5 раза меньше, чем в односекционном аппарате. При этом 60 - 70 % влаги удаляется из материала в первой секции аппарата. Показано, что отработанный сушильный агент из последних секций аппарата может быть использован обратно для проведения процесса сушки.

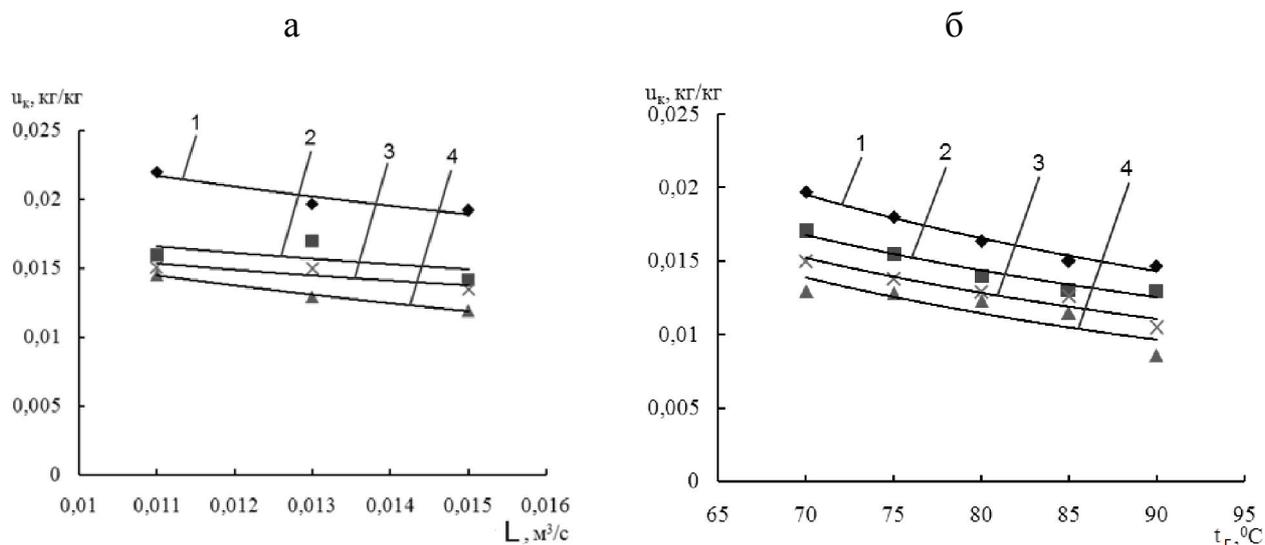


Рис. 3. Зависимости изменения конечного влагосодержания золы ТЭЦ от расхода (а) и температуры (б) сушильного агента на входе в сушилку при различном количестве секций в аппарате: 1,2,3 и 4 - одно-, двух-, трех- и четырехсекционный аппараты, соответственно; $G_{с.м} = 7 \cdot 10^{-4}$ кг/с; $u_{нач} = 0,17$ кг/кг; рис. 3а: $t_{г.вх} = 70$ °C; рис. 3б: $L = 0,011$ м³/с.

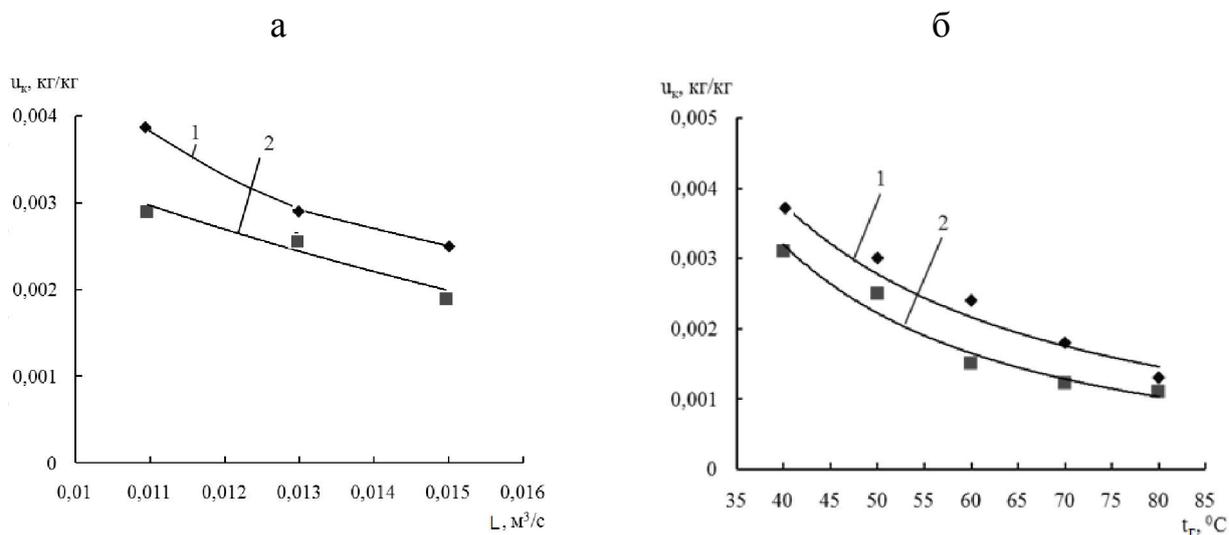


Рис. 4. Зависимости изменения конечного влагосодержания кварцевого песка от расхода (а) и температуры (б) сушильного агента на входе в аппарат при различном количестве секций: 1, 2 – одно- и двухсекционный аппарат, соответственно; $G_{с.м} = 7 \cdot 10^{-4}$ кг/с; $u_{нач} = 0,087$ кг/кг; рис. 4а: $t_{г.вх} = 40$ °C; рис. 4б: $L = 0,011$ м³/с.

Для установления адекватности математических моделей реальному процессу были составлены программы с помощью пакета Mathcad 14. На рис. 5 приведены расчетные кривые изменения влагосодержания и температуры воздуха по высоте кипящего слоя золы ТЭЦ в четырехсекционной сушилке. На рис. 6 показаны в сравнении результаты расчета и эксперимента распределения

влажностердания материала по секциям аппарата в процессе сушки золы ТЭЦ и кварцевого песка. Среднее отклонение расчет от эксперимента составляет не более 10 %.

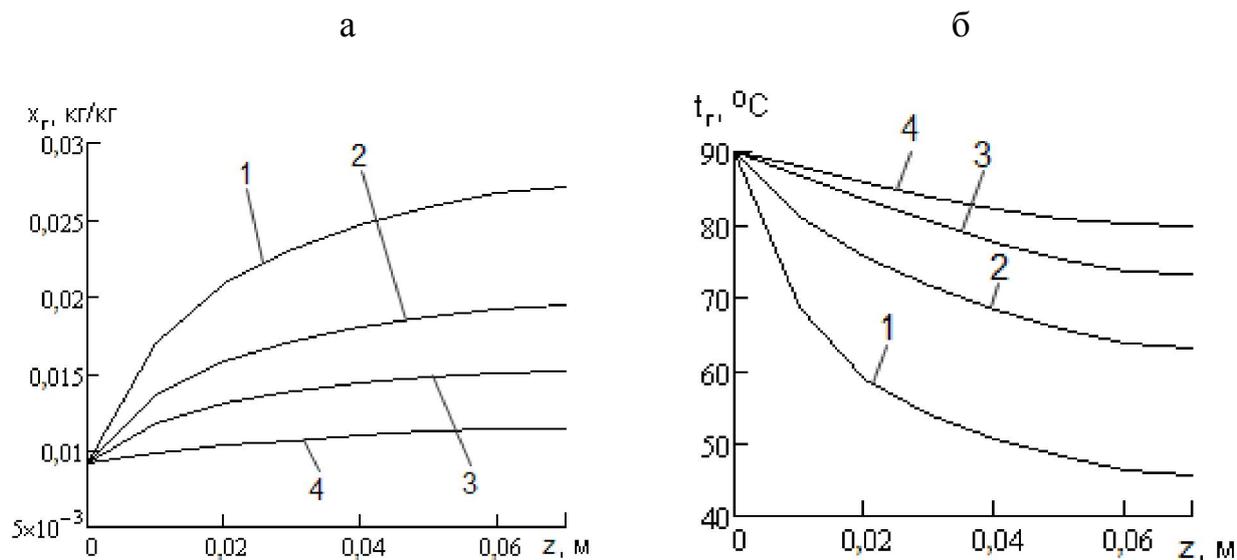


Рис. 5. Кривые изменения расчетных значений влагосодержания (а) и температуры (б) воздуха по высоте кипящего слоя золы ТЭЦ в четырехсекционной сушилке: номер секции: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4; $G_{с.м} = 7 \cdot 10^{-4}$ кг/с; $L = 0,011$ м³/с; $t_{г.вх} = 90$ °С.

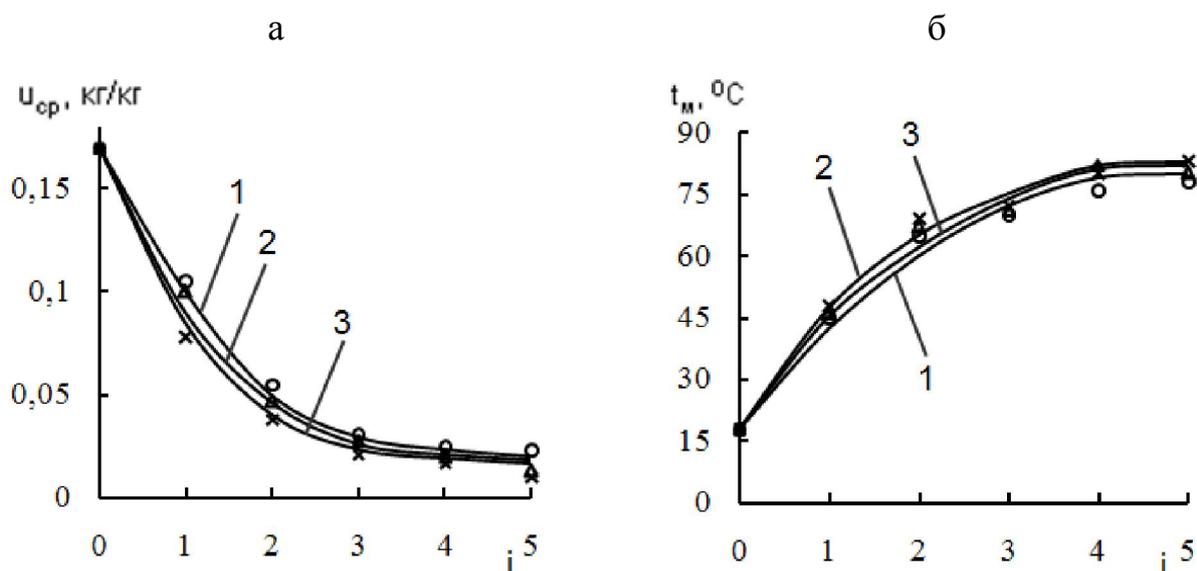


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных данных распределения влагосодержания (а) и температуры (б) золы ТЭЦ в сушилке: $i = 0$ – вход в аппарат, $i = 1 \div 4$ – номер секции, $i = 5$ – выход из аппарата;

$G_{с.м} = 7 \cdot 10^{-4}$ кг/с; $t_r = 90$ °С; $L \cdot 10^3$, м³/с: 1 – 1,1; 2 – 1,3; 3 – 1,5;

точки – экспериментальные данные, линия – расчетная кривая.

В четвертой главе приводятся данные о результатах испытаний полупромышленной сушилки кипящего слоя в производстве керамического кирпича. Приводится методика инженерного расчета многосекционной сушилки кипящего слоя, в основу которой положены разработанные

математические модели и результаты экспериментальных исследований. С помощью разработанной методики рассчитаны габаритные размеры и режимные параметры работы аппарата. Показано, что удельные затраты тепловой энергии в разработанной многосекционной сушилке кипящего слоя на 10 % меньше, чем в существующей барабанной сушилке.

В приложениях к работе приведены результаты экспериментальных исследований процесса сушки кварцевого песка и золы ТЭЦ, а также акт о полупромышленном испытании многосекционного аппарата кипящего слоя.

Основные результаты и выводы

1. Разработана новая конструкция сушилки непрерывного действия кипящего слоя, позволяющая повысить эффективность процесса сушки за счет секционирования кипящего слоя вертикальными перегородками и использования инжектирующих трубок в переточных устройствах для перемещения влажного материала из секции в секцию.

2. Получены новые решения краевых задач тепломассопереноса для первого и второго периодов сушки дисперсных материалов в многосекционном аппарате кипящего слоя, учитывающие нелинейность равновесной зависимости, полное диффузионное сопротивление массопереносу, термическое сопротивление теплопередаче, продольное перемешивание газовой фазы и идеальное перемешивание твердой фазы.

3. Получены изотермы десорбции воды с поверхности кварцевого песка и золы ТЭЦ методом Пасса и с помощью метода наименьших квадратов установлено, что в интервале относительной влажности от 0 до 35 % изотермы десорбции удовлетворительно описываются уравнением полимолекулярной адсорбции БЭТ.

4. Проведены исследования процесса сушки кварцевого песка и золы ТЭЦ в многосекционной сушилке кипящего слоя, в результате которых установлено, что высушенный материал имеет конечную влажность в среднем в 1,3 раза меньше, чем в односекционной сушилке при одинаковых условиях проведения процесса, и отработанный сушильный агент из последних секций аппарата может быть использован обратно для проведения процесса сушки.

5. На основании сравнения результатов расчета и эксперимента доказана адекватность разработанных математических моделей реальному процессу сушки дисперсных материалов.

6. Разработана методика инженерного расчета сушилки кипящего слоя с вертикальными секционирующими перегородками, позволяющая рассчитать габаритные размеры аппарата, расход сушильного агента и распределение влагосодержания и температуры высушиваемого материала и сушильного агента по секциям аппарата.

7. Научные и прикладные результаты исследований позволили разработать рекомендации для внедрения разработанной конструкции многосекционной сушилки кипящего слоя на ОАО «Ивстройкерамика» г. Иваново.

Основные обозначения

a_0 – удельная поверхность на единицу объема твердой частицы материала, $\text{м}^2/\text{м}^3$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; D – коэффициент продольного перемешивания, $\text{м}^2/\text{с}$; G – массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$; H – высота, м ; K_m, K_x – коэффициенты скорости сушки, выраженные соответственно через концентрацию влаги в твердой и газовой фазах, $1/\text{с}$; $K_{o.c.}$ – коэффициент теплопередачи от воздуха в сушильной камере к окружающей среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; k, u_m – константы изотермы БЭТ; L – расход газовой фазы, $\text{м}^3/\text{с}$; n – количество секций, шт; m – угловой коэффициент; N – скорость сушки в первый период, $1/\text{с}$; R_p – радиус газораспределительной решетки, м ; r^* – удельная теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; t – температура, $^\circ\text{C}$; u – влагосодержание материала, $\text{кг}/\text{кг}$; v – скорость потока газовой фазы, $\text{м}/\text{с}$; x_r – влагосодержание воздуха, $\text{кг}/\text{кг}$; z – координата, м ; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$; τ_0 – среднее время пребывания частиц материала в секции аппарата, с ; γ – угол конусности сушилки, град; ε – порозность псевдооживленного слоя; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; φ – относительная влажность воздуха, доли.

Индексы: а.с.м – абсолютно сухой материал; ап – аппарата; вл.м. – влажный материал; вп – водяной пар; вх – входящий; вых – выходящий; г – газ (воздух); ж – жидкость; из – изоляция; к – конечный; м – материал; м.т – мокрый термометр; н.п – наружная поверхность; о.с – окружающая среда; п – поверхность; р – равновесный; с.м. – сухой материал; сл – слой; сек – секция; ср – среднее; т – твердая фаза; о – начальный; ч – частица.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Иванов, В.Е. Сушка дисперсных материалов в многосекционном аппарате кипящего слоя / В.Е. Иванов, С.В. Натареев, Е.Н. Венкин // Изв. ВУЗов “Химия и химическая технология”. - Т. 53. № 1. – 2010. - С. 129-130.
2. Натареев, А.С. Процессы тепло- и массообмена в аппаратах простых геометрических форм / А.С. Натареев, В.П. Созинов, В.Е. Иванов // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 29-34.
3. Иванов, В.Е. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена в системах с дисперсной твердой фазой / В.Е. Иванов, Т.Е. Слизнева, А.С. Натареев // Сб. тр. международной научной конференции “Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием”. - Иваново. – 2007. - Т. 1. – С. 169-176.
4. Иванов, В.Е. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов в сушилке с кипящим слоем / В.Е. Иванов, А.В. Ткачев, А.С. Натареев // Сб. тр. XIX Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях ММТТ - 19”. – Воронеж. – 2006. - Т. 3. - С. 104-106.
5. Иванов, В.Е. Модель процесса конвективной сушки дисперсных материалов / В.Е. Иванов, А.С. Натареев, С.А. Гунько // Сб. тр. XX Международной

научной конференции “Математические методы в технике и технологиях ММТТ-20”. - Ярославль. – 2007. – Т. 5. – С.19-20.

6. Натареев, С.В. Экспериментальные и теоретические исследования в многосекционном аппарате кипящего слоя / С.В. Натареев, В.Е. Иванов, А.Е. Кочетков // Сб. тр. XXII Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22”. Под. ред. В.С. Балакерева – Т. 9.- Псков: Изд-во ПГПИ. – 2009. – С. 81-82.

7. Натареев, С.В. Математическая модель аппарата с секционированным кипящим слоем дисперсного материала / С.В. Натареев, А.Е. Кочетков, В.Е. Иванов // Сб. тр. XXII Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22”. Под. ред. В.С. Балакерева. - Т. 9. - Псков: Изд-во ПГПИ. – 2009. – С. 79-80.

8. Балдов, А.Б. Кинетика сушки АБС сополимеров / А.Б. Балдов, Р.В. Носков, В.Е. Иванов // Тезисы докладов VI Региональной студенческой научной конференции “Фундаментальные науки – специалисту нового века”. – Иваново. – 2006. - С. 143.

9. Иванов, В.Е. Модель процесса сушки в сушилке конической формы с кипящим слоем / В.Е. Иванов, А.В. Ткачев, А.С. Натареев // Тезисы докладов VI Региональной студенческой научной конференции “Фундаментальные науки – специалисту нового века”. – Иваново. – 2006. - С. 149.

10. Носков, Р.В. Расчет зоны сепарации в сушилке конической формы с кипящим слоем / Р.В. Носков, В.Е. Иванов, А.В. Ткачев // Тезисы докладов VI Региональной студенческой научной конференции “Фундаментальные науки – специалисту нового века”. – Иваново. – 2006. - С. 159.

11. Иванов, В.Е. Исследование процесса сушки АБС сополимеров / В.Е. Иванов, А.С. Натареев, В.П. Созинов // Тезисы докладов XI Международной научно-технической конференции “Наукоемкие химические технологии”. – Самара. – 2006. - С. 76-77.

12. Иванов, В.Е. Кинетика процесса сушки дисперсных материалов / В.Е. Иванов, С.В. Натареев, С.А. Гунько, А.С. Натареев // Доклады Всероссийской научно-технической конференции “Приоритетные направления науки и техники”. Под ред. В.П. Мешалкина – М.: Тула: Изд-во ТулГУ. - Кн. 1. – 2006. - С. 158-160.

13. Иванов, В.Е. Моделирование и расчет процесса сушки дисперсных материалов / В.Е. Иванов, С.А. Гунько, А.Е. Кочетков // Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии”. - Томск. – 2007. – С. 212-214.

14. Натареев, С.В. Проблемы интенсификации процессов сушки дисперсных материалов / С.В. Натареев, В.Е. Иванов, Д.С. Казаков // Сб. тр. международной научной конференции “Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием”. - Иваново. – 2007. – Т. 2. – С. 55.

15. Натареев, С.В. Повышение надежности работы аппарата с кипящим слоем дисперсного материала / С.В. Натареев, В.Е. Иванов, А.Е. Кочетков, О.С. Натареев // Материаловедение и надежность триботехнических систем: сборник научных трудов / Под. ред. В.А. Годлевского, Б.Р. Киселева; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – с. 138-139.

16. Натареев, С.В. Исследование процессов массообмена в аппарате с кипящим слоем дисперсного материала / С.В. Натареев, А.Е. Кочетков, В.Е. Иванов // III Международная научно-техническая конференция “Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности”. - Воронеж. – Т. 2. – 2009. – С. 291.

17. Пат. 82587 Российская Федерация, МПК F26B17/10. Многосекционный аппарат кипящего слоя / Иванов В.Е., Натареев С.В., Кочетков А.Е., Натареев А.С., Соловьева Е.А.; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный химико-технологический университет. - № 2008147940/22; заявл. 04.12.2008; опубл. 10.05.09, Бюл. № 18.