

На правах рукописи

Тимофеев Иван Егорович

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ХЛОРИДА КАЛИЯ
В ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ТРУБЕ-СУШИЛКЕ**

Специальность 05. 17. 08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты производственных процессов» в Пермском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Сафар Хабибуллович Загидуллин

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сваровский Александр Яковлевич,
доктор технических наук, профессор
Кудрявский Юрий Петрович

Ведущая организация: ОАО «Уралкалий», 618426, Пермский край,
г. Березники, ул. Пятилетки, 63

Защита состоится «____» _____ 2009 г. в _____ часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 2, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат технических наук,
доцент

Петровская Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сушка в производстве минеральных удобрений является завершающим технологическим процессом, который в значительной мере определяет качество продукта по содержанию влаги, дисперсному и химическому составу, слеживаемости и др. Для сушки хлорида калия (KCl), являющегося основным видом калийных удобрений, используют барабанные сушилки, сушилки псевдоожиженного слоя и пневматические трубы-сушилки.

В настоящее время наиболее распространенными и изученными являются установки псевдоожиженного слоя. Однако длительный опыт эксплуатации выявил их существенные недостатки. В первую очередь, это неизбежный перегрев высушиваемого материала и связанное с этим снижение термического к. п. д. сушилки и необходимость охлаждения продукта перед складированием и др.

К более новым и менее изученным относятся пневматические трубы-сушилки. По некоторым показателям они пока уступают сушилкам псевдоожиженного слоя, но выгодно отличаются простотой конструкции и малой металлоемкостью, легкостью управления, обслуживания и др. Кроме того, они работают под разрежением, что обеспечивает большую безопасность и хорошие санитарные условия.

Перечисленные достоинства позволяют отнести сушилки трубы-сушилки к одним из наиболее перспективных типов аппаратов. Однако в полной мере реализовать их преимущества можно лишь на базе комплексного изучения всех особенностей работы данных аппаратов, включая кинетику сушки, гидродинамику движения двухфазного потока, разработку уточненной математической модели процесса и др.

Диссертационная работа выполнена по результатам поисково-постановочных исследований, планов НИР университета и гранта, удостоенного в рамках «Соглашение о сотрудничестве» от 31 января 2006 г. между ОАО «Уралкалий», ОАО «Сильвинит» и ПГТУ.

Цель работы. Установление основных тепломассообменных и гидродинамических показателей конвективной сушки дисперсного материала и на этой

основе совершенствование конструкции труб-сушилок для более эффективного использования термического потенциала теплоносителя.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать гидродинамику газовзвеси в пневматической трубе;
- определить кинетические закономерности сушки KCl при различных тепловых и гидродинамических режимах;
- исследовать сушку KCl в промышленных аппаратах;
- разработать математическую модель сушки хлорида калия в трубе-сушилке.

Научная новизна исследований.

1. На основе экспериментальных исследований движения восходящего двухфазного потока на разгонном участке вертикальной трубы установлена зависимость модифицированного коэффициента трения от геометрических размеров трубы, концентрации материала и относительного критерия Рейнольдса,

$$\lambda_{м.тр} = 0,5 Re_{отн}^{0,5} \mu^{0,2} (h/D)^{0,1} \exp(-4h/H).$$

2. Численные значения относительных коэффициентов сушки для первого и второго периодов ($0,981 \pm 0,016$ и $1,038 \pm 0,047$ 1/масс. %), критической влажности между ними ($0,97 \pm 0,08$ масс. %) получены при различных температурах теплоносителя (27 и 40 °C) и начальной влажности хлорида калия (2,59–8,10 %).

3. Из обобщенной кривой сушки, характеризующей разные гидродинамические и тепловые условия процесса, определен кинетический инвариант, связывающий между собой начальную влажность хлорида калия, скорость сушки и время первого периода, $N_I \tau_I = 0,8 W_n$.

4. По данным лабораторных исследований и промышленных испытаний пневматических сушилок и аппаратов псевдоожиженного слоя установлены аналитические зависимости между температурой и влагосодержанием хлорида калия, коэффициенты которых отличаются друг от друга в среднем на 7,0 %.

5. На основе анализа материального и теплового балансов обоснован комплексный безразмерный показатель сушки, выражающий отношение общей

тепловой мощности сушильного агента на входе в аппарат к максимальным затратам тепла на испарение заданного количества влаги, $M = c_n \theta_n / (\mu W_n r(t_{M.T}))$.

6. С учетом известных и вновь полученных зависимостей разработана достаточно полная усовершенствованная математическая модель конвективной сушки хлорида калия в пневматической трубе-сушилке.

Практическое значение работы. Установленные кинетические закономерности сушки KCl и гидродинамические характеристики движения двухфазного потока использованы при совершенствовании действующих и разработке новых сушильных аппаратов. Теоретические и экспериментальные данные, положенные в основу усовершенствованной математической модели сушки частиц с поверхностной влагой, дают возможность моделировать и оптимизировать сушку аналогичных материалов в дисперсных потоках. Результаты разработки позволяют упростить методику расчета процесса сушки и более эффективно использовать существующее в калийной отрасли оборудование.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование уравнения движения двухфазного потока на разгонном участке вертикальной трубы с учетом коэффициента гидродинамического сопротивления и модифицированного коэффициента трения;
- определение влияния начальной влажности хлорида калия и температуры теплоносителя на значения относительных коэффициентов сушки и критической влажности между периодами;
- установление кинетического инварианта как одного из основных характеристик процесса сушки твердых частиц с поверхностным солевым раствором;
- определение в условиях псевдоожижения и пневмотранспорта общей аналитической зависимости между температурой и влагосодержанием хлорида калия при различных гидродинамических и тепломассообменных параметрах;
- теоретическое обоснование комплексного безразмерного показателя сушки, характеризующего определенный тепломассообменный режим и установление возможности его использования в качестве исходного оптимизирующего воздействия.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций базируются на применении основополагающих физических законов, надежных методов теоретического и экспериментального исследований. Соблюдается хорошее соответствие результатов лабораторных и промышленных испытаний, опытных и расчетных показателей изучаемого процесса.

Личный вклад автора. Автором внесен основной творческий вклад в большинство опубликованных работ. Осуществлена постановка задач и их решение. Обобщены результаты исследований и установлены закономерности процесса; составлены методики экспериментальных исследований; участие в разработке технических решений.

Апробация работы. Основные результаты работы и ее отдельные разделы докладывались на Всесоюзн. НТС «Повышение эффективн. и надежн. машин и аппаратов в основной химии», г. Сумы, 1986 г.; Всесоюзн. совещ. «Калийные удобрения и их эффективное использование», г. Солигорск, 1988 г.; Всероссийск. научно-практ. конф. «Проблемы образования, научно-технич. развития и экономики Уральского региона», г. Березники, 1996 г.; Междунар. научн. конф. «Математические методы в технике и технологиях», г. С.-Петербург, 2000 г.; I Междунар. НТК «Аналитические и численные методы моделирования естественнонаучных и социальных проблем», г. Пенза, 2006г., а также годовых НТК ПермГТУ, 1998 – 2003 г.г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 9 научных статей, в том числе 2 в журналах, рекомендуемых ВАК и получены 2 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 6 глав и общих выводов, изложенных на 137 страницах машинописного текста и 41 рисунке, списка литературы, включающего 133 наименования и Приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, обоснованы и сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе анализируются гидродинамика движения двухфазного потока в вертикальной трубе, состояние техники и технологии сушки в калийной отрасли. Приводятся различные факторы и параметры, влияющие на значения коэффициентов гидродинамического сопротивления и трения при движении дисперсного потока на разгонном и стабилизированном участках вертикальной трубы.

Рассмотрены важнейшие показатели конвективной сушки дисперсных материалов. Выполненный анализ показал, что для хлорида калия отсутствуют значения относительного и температурного коэффициентов сушки, выражения для определения температуры и влагосодержания материала. Для интенсификации сушки и разработки инженерного метода расчета трубы-сушилки необходимо установление зависимостей, учитывающих индивидуальные свойства материала и позволяющие определить основные параметры работы аппарата.

Во второй главе приводятся методики лабораторных исследований гидродинамики движения двухфазного потока на разгонном участке вертикальной трубы, процесса сушки хлорида калия при различных гидродинамических и теплообменных условиях, определения эффективности использования тепла в пневматической сушилке и испытаний промышленных труб-сушилок по определению температуры, влагосодержания хлорида калия по высоте аппарата. Обработка результатов исследований основывалась на использовании математических методов корреляционного и регрессионного анализов, численных методов решения дифференциальных уравнений с использованием программы MathCAD.

В третьей главе анализируются теоретические предпосылки к определению модифицированного коэффициента трения, обосновывается выбор уравнения движения частиц в вертикальной трубе. Показано, что в уравнении движения наряду с коэффициентами лобового сопротивления и трения интенсивность взаимодействия частиц между собой и со стенкой трубы можно учитывать модифицированным коэффициентом трения.

Обобщены результаты экспериментальных исследований гидродинамики двухфазного потока на начальном участке вертикальной трубы, установлена зависимость модифицированного коэффициента трения от геометрических и гидродинамических параметров, сопоставлены расчетные и опытные значения скорости движения частиц.

На разгонном участке высотой, равной нескольким диаметрам трубы, дисперсный материал склонен к образованию различных пакетов и кратковременных скоплений, носящих вероятностный характер. Для пакетов частиц скорость обтекания газом $(v - v_T)$ различна на внешних границах и внутренних. Из-за изменения размеров пакетов относительное число Рейнольдса ($Re_{отн}$) может меняться от нуля до неопределенной величины.

В ламинарном и переходном режимах основную роль играет сопротивление трения. Внутри движущегося пакета частиц из-за небольших относительных скоростей превалируют силы трения. В этом случае можно принять $\xi = \lambda_{TP}$ и уравнение движения частиц без учета взаимодействия их между собой и стенкой трубы в общем виде можно представить как:

$$F_{ин} = F_{соп}(\lambda_{TP}) - F_{тяж} \quad (1)$$

При преобладании в потоке сил инерции ($Re_{отн} > 3000$) правая часть уравнения (1) обычно дополняется двумя слагаемыми, отражающими результат интенсивного взаимодействия частиц между собой и со стенкой трубы. Тогда для шарообразной частицы уравнение движения принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{dv_{Ti}}{dz} \equiv & 3/4 \left[(\xi_i \rho) / (d_i \rho_T v_{Ti}) \right] (v - v_{Ti})^2 - g / v_{Ti} - 3/4 (\rho v) / v_{Ti} \sum_{\gamma=1}^n E_{\gamma i} \times \\ & \times (1 + k_{nyi}) \frac{\mu_i (d_i + d_\gamma)^2}{\rho_T (d_i^3 + d_\gamma^3)} \frac{v_{T\gamma} - v_{Ti}}{v_{T\gamma}} |v_{T\gamma} - v_{Ti}| - K_r \frac{\lambda v}{2 D}. \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициент осаждения $E_{\gamma i}$ равен вероятности столкновения частиц диаметрами d_γ и d_i . В реальном процессе сушки условия для столкновения частиц именно таких размеров практически не будут соблюдаться, так как возможны контакты одной из них и с частицами других размеров. Значение коэффициента восстановления нормальных составляющих скорости частиц k_{nyi} при

их взаимных соударениях в реальном аппарате по вышеприведенным причинам оценить правильно также трудно. В результате третье слагаемое в правой части уравнения (2) не только сложно определить численно, но и установить степень его участия в расчете принятых размеров частиц.

Задержку частиц из-за их взаимных столкновений в зоне забрасывания в аппарат следует рассматривать как кратковременное возрастание «условной массы», сила тяжести которой направлена навстречу газовому потоку. При таком допущении уравнение движения двухфазного восходящего потока можно представить как: $F_{ин} = F_{соп}(\xi_{л.с}) - F_{тяж} - F_{тр}(\lambda_{м.тр})$. (3)

Таким образом, если учесть взаимодействие частиц со стенкой трубы и совместное действие коэффициентов $E_{\gamma i}$, $k_{n\gamma i}$, K_r заменить модифицированным коэффициентом трения $\lambda_{м.тр}$, то уравнение движения частиц произвольной формы в восходящем потоке на участке dz с учетом (3) приобретает следующий вид

$$\frac{dv_T}{dz} = \frac{\zeta \rho (v - v_T)^2 S_{мид}}{2 m_T v_T} - \frac{g}{v_T} - \frac{\lambda_{м.тр} \lambda v}{2 D}. \quad (4)$$

Для определения опытного значения $\lambda_{м.тр}$ использовали уравнение движения одномерного вертикально направленного двухкомпонентного потока

$$\begin{aligned} \rho \bar{\varepsilon} \bar{v} \frac{dv}{dz} + \rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) \bar{v}_T \frac{dv_T}{dz} = -\rho \bar{\varepsilon} g - \rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) g - \frac{dP}{dz} - \lambda \frac{\rho \bar{\varepsilon} (\bar{v})^2}{2 D} - \\ - \lambda_{м.тр} \frac{\rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) (\bar{v}_T)^2}{2 D}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решая (5) относительно $\lambda_{м.тр}$, получим

$$\begin{aligned} \lambda_{м.тр} = \frac{2 D \rho \bar{\varepsilon} \bar{v}}{\rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) (\bar{v}_T)^2} \frac{dv}{dz} + \frac{2 D}{\bar{v}_T} \frac{dv_T}{dz} + \frac{2 D \rho \bar{\varepsilon} g}{\rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) (\bar{v}_T)^2} + \frac{2 D g}{(\bar{v}_T)^2} + \frac{2 D}{\rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) (\bar{v}_T)^2} \times \\ \times \frac{dP}{dz} + \frac{\lambda \rho \bar{\varepsilon} (\bar{v})^2}{\rho_T (1 - \bar{\varepsilon}) (\bar{v}_T)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Гидродинамические характеристики двухфазного потока исследовали методом отсечек на установке, представленной на рис. 1. Вертикальная труба по

высоте была разделена на три секции высотой 0,35; 0,31 и 0,47 м, между которыми имелись быстродействующие отсекающие устройства.

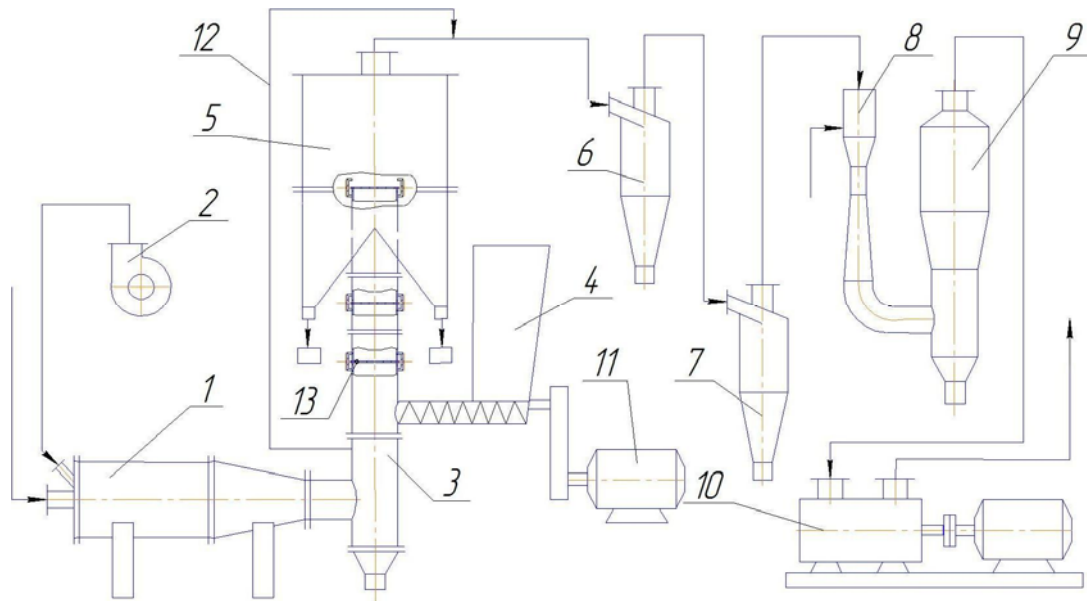


Рис. 1. Схема экспериментальной сушильной установки:

1 – топка; 2 – вентилятор центробежный; 3 – корпус сушилки; 4 – устройство загрузочное; 5 – камера сепарационная; 6 – 7 – циклоны ЦН-11; 8 – скруббер Вентури; 9 – каплеуловитель; 10 – вакуум-насос; 11 – э/двигатель; 12 – обводной газопровод; 13 – отсекающее устройство.

В качестве дисперсного материала использовали речной песок фракции $(-0,5 + 0,315)$ мм. Нагрузку варьировали от 150 до 960 кг/ч, скорость воздушного потока под зоной загрузки материала изменяли в пределах 8,5 – 12,9 м/с при его температуре ~ 20 °С. Исследования проводили в переходной области движения твердой фазы и турбулентной для воздуха. Экспериментальные данные были подвергнуты математической обработке, в результате которой получено уравнение

$$\lambda_{м.тр} = 0,5 Re_{отн}^{0,5} \mu^{0,2} (h/D)^{0,1} \exp(-4h/H). \quad (7)$$

Алгоритм расчета скорости частиц в вертикальной трубе был составлен на основе уравнений (4 и 7) при следующих условиях: масса и плотность частиц равны 0,1337 мг и 2,547 г/см³, диаметр шаровой частицы 0,465 мм, температура воздуха 20 °С, начальная скорость частиц принята равной 0,1 м/с, диаметр и высота трубы 0,1 и 1,15 м. Коэффициент формы частиц песка f принят

равным 1,17. Графическое представление опытных и расчетных значений скорости частиц показано на рис. 2.

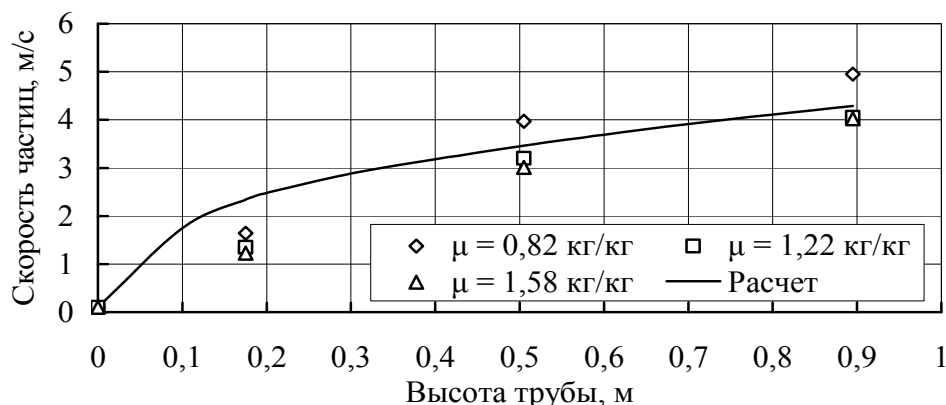


Рис. 2. Изменение скорости движения частиц песка по высоте вертикальной трубы. Концентрация материала – 1,22 кг/кг. Скорость воздуха – 10,4 м/с

Средняя относительная погрешность скорости частиц (в виде остаточной дисперсии) между данными опыта и расчета в интервале исследованных скоростей (8,5 – 12,9 м/с) составила: для первого участка – 23,7 %, второго – 10,9 %, третьего – 9,6 %.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований кинетики сушки KCl. На первом этапе изучали испарение влаги из тонкого слоя насыщенного эвтонического раствора (KCl+NaCl) с плоской поверхности образца сильвинитовой руды, а также сушку монослоя частиц KCl фракции (–2,0+1,0) мм в естественных условиях при температуре воздуха 27 и 40 °С.

На втором этапе исследовали сушку узкой фракции крупнозернистого (–2,0+1,0) мм и мелкозернистого полидисперсного (–1,0+0,16 мм) KCl топочными газами с температурой 100 – 600 °С на пилотной установке псевдоожиженного слоя (рис. 1).

Полученные экспериментальные данные показали, что сушка KCl осуществляется в периоды постоянной и падающей скоростей. До 80 % всей влаги испаряется в первом периоде. Резкое изменение угла наклона кривых сушки между этими периодами объясняется изменением микрорельефа поверхности кристаллов KCl из-за вторичной кристаллизации солей из увлажняющего рас-

твора. Критическая влажность KCl мало зависит от его начальной влажности и ее среднее значение составляет $0,97 \pm 0,08$ масс. %. Сушка характеризуется двумя относительными коэффициентами, соответствующим двум периодам и их средние значения ($0,981 \pm 0,016$ и $1,038 \pm 0,047$ 1/масс. %) отличаются друг от друга на 5,6 %. Установлена независимость этих коэффициентов от начальной влажности U_n , масс. % (влагосодержания W , кг/кг) и теплового режима сушки.

Скорость процесса возрастает с увеличением температуры и скорости теплоносителя, являясь функцией интенсивности подвода тепла. При этом длительности первого и второго периодов сближаются между собой.

В «жестких» режимах сушки в псевдоожиженном слое (ПС) температура соли непрерывно повышается, а текущее влагосодержание однозначно определяется ее температурой. Характер кривых $t = f(W)$ с ростом температуры практически не меняется и при 330 – 600 °С опытные данные описываются уравнением:

$$t = 51,08 + 1,09 W_i^{-0,55} \quad (8)$$

Данные, полученные при разных тепловых и гидродинамических режимах сушки, удовлетворительно укладываются на обобщенную кривую в координатах $W/W_n - N_I \tau / W_n$ (рис. 3).

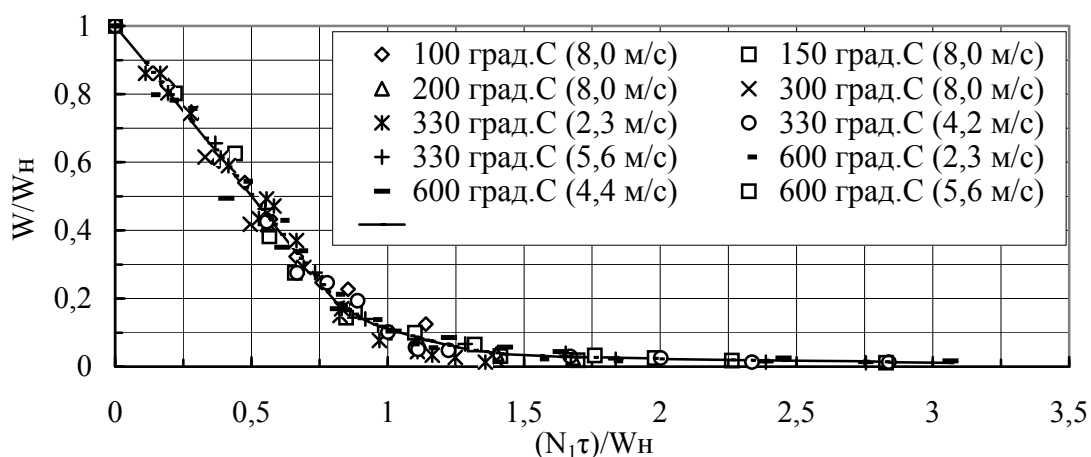


Рис. 3. Обобщенная кривая сушки крупнозернистого (–2,0+1,0 мм) и мелкозернистого (–1,0+0,16 мм) KCl при различных температурах и скоростях теплоносителя

В качестве инварианта сушки предложено равенство $N_I \tau_l = 0,8 W_n$. (9)

Пятая глава посвящена изучению возможности интенсификации тепло-массообмена в пневматических трубах-сушилках.

Степень совершенства трубы-сушилki с точки зрения эффективности использования тепла предложено оценить сопоставлением температур теплоносителя и материала на входе и выходе из аппарата в виде коэффициента неиспользованного тепла

$$K_{н.т} = \frac{\theta_K - t_K}{\theta_H - t_H} \quad (10)$$

С целью определения влияния различных внутренних устройств на интенсивность теплообмена были проведены лабораторные исследования со вставками различной конструкции (рис. 4 а - в).

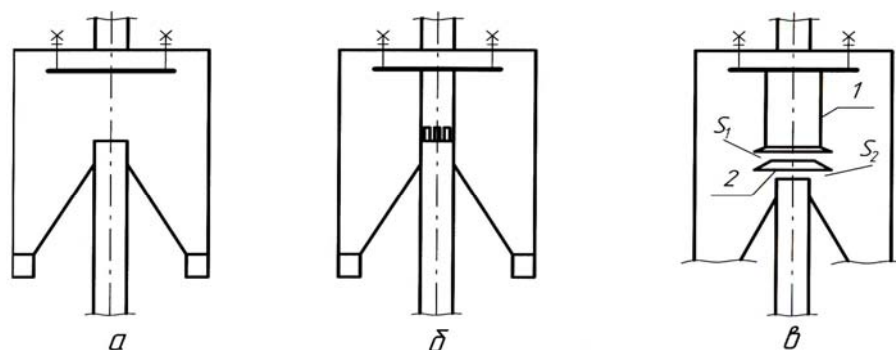


Рис. 4. Различные варианты внутренних устройств в верхней части ТС:
а – плоская отбойная пластина («тарель»), б – вставка с прорезями,
в – вставка демпферная (1) с завихрителем (2)

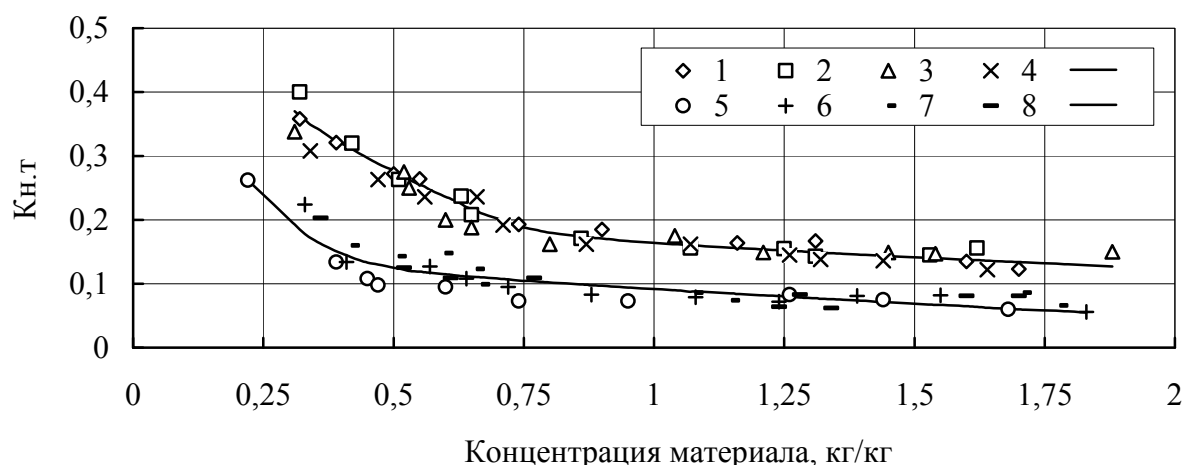


Рис. 5. Зависимость коэффициента неиспользованного тепла от концентрации материала при температуре 100 °С.
«Тарель»: 1 – 9,4 м/с; 2 – 12,1 м/с; 3 – 14,3 м/с; 4 – 16,5 м/с.
Вставка: 5 – 9,4 м/с; 6 – 12,1 м/с; 7 – 14,3 м/с; 8 – 16,5 м/с

Из анализа полученных результатов следует, что величина $K_{н.т}$ с ростом концентрации материала снижается (рис. 5), причем в сопоставимых условиях эффективность теплообмена в аппарате со вставкой (рис. 4 б) заметно выше, чем используемой в промышленных трубах-сушилках «тарелью» (рис. 4 а).

Это объясняется тем, что в прорезях вставки создается переменное «живое» сечение, изменяется направление движения потока и увеличивается среднее время пребывания частиц в трубе. Установлено также, что коэффициент $K_{н.т}$ обладает автомодельностью по отношению к скорости теплоносителя (в изученных пределах 9,4 – 16,5 м/с). Это указывает на целесообразность учета концентрации материала как вспомогательного параметра при оценке эффективности использования тепла в ТС. В результате анализа опытных данных была получена зависимость коэффициента неиспользованного тепла от концентрации материала

$$K_{н.т} = A \exp(-B \mu), \quad (11)$$

где A и B – опытные коэффициенты.

Для «тарели» $A = 0,35$; $B = 0,63$; для вставки $A = 0,18$; $B = 0,64$. С учетом выражений (10) и (11) можно приближенно оценить величину температуры зернистых материалов при нагреве в прямоточных пневматических аппаратах с различными внутренними интенсифицирующими устройствами и произвести прогнозную оценку эффективности их использования.

$$t_K = \theta_K - (\theta_H - t_H) A \exp(-B \mu) \quad (12)$$

Полученные лабораторные данные были использованы при модернизации труб-сушилок на Первом Березниковском калийном рудоуправлении ОАО «Уралкалий» и проектировании труб-сушилок на ОАО «Метафракс», г. Губаха. В промышленном варианте вставка была выполнена в виде демпферного устройства (аналогично рис. 4 в). Общая высота вставки 4 м, площадь поперечного сечения равна удвоенному сечению сушилки при её диаметре равном 0,8 м.

В результате пневмометрических исследований установлено, что внутри такой вставки отсутствует какое либо направленное движение газовой среды, а отмечаются лишь ее колебания. Результаты измерения скорости газового по-

тока в промышленном аппарате подтвердили характер движения аэровзвеси в лабораторной модели демпферной вставки. Внутри нее отчетливо прослеживаются два дисперсных потока, а именно, движущийся по инерции восходящий центральный поток, являющийся продолжением пневматической трубы, и второй – нисходящий кольцевой поток, движущийся вдоль боковой стенки вставки. Основная часть газа, минуя вставку, сразу попадает в кольцевое пространство между ней и концом трубы.

Для определения влияния различных устройств (вставки и плоской «тарели») на эффективность сушки были проведены сравнительные промышленные испытания одновременно работающих труб-сушилок (ТС) на БКРУ-1: ТС-1 (со вставкой), ТС-3 (с «тарелью»). Объектами сушки являлись флотационный и галургический КСІ с начальной влажностью 5,20 – 5,22 масс. %. Расход топочных газов составил для ТС-1 – 66258 м³/ч, а для ТС-3 – 78811 м³/ч, производительность обоих аппаратов в среднем составляла $72 \pm 0,2$ т/ч.

Результаты испытаний полностью подтвердили высокую эффективность использования разработанной конструкции вставки. При сопоставимых условиях эксплуатации удельные затраты условного топлива в сушилке со вставкой (ТС-1) в среднем сократились на 25,3 % по сравнению с ТС-3 с «тарелью». Одновременно достигнуто существенное сближение температур высушенного материала и отработанного теплоносителя, а именно, для мелкозернистого КСІ эта разность не превышала 11 °С, а для галургического КСІ она не достигала даже 8 °С. При работе ТС с «тарелью» эта разность составляет 15 °С и более.

Эти положительные изменения объясняются тем, что внутри вставки возникают локальные участки торможения (подъема) и разгона (падения), а в пространстве между вставкой и верхним концом трубы создаются перекрестные потоки газа и частиц. Благодаря этому увеличивается время пребывания материала в активной зоне сушилки.

В шестой главе проанализированы известные математические модели процесса сушки дисперсных продуктов в ТС. На основе промышленных испытаний разработано достаточно надежное математическое описание процесса

сушки КСІ, в данном типе аппарата показана адекватность опытных и расчетных значений температур и влагосодержаний. Система уравнений движения частиц полидисперсного материала, кинетики сушки и нагрева материала совместно с уравнениями теплового и материального балансов представляет собой достаточно полную модель сушки в вертикальной ТС.

Необходимость уменьшения большого числа трудно определяемых коэффициентов внешнего и внутреннего тепломассообмена привело к появлению моделей частного характера, касающихся только конкретного материала и основанные на уточняющих предположениях (Андреева О.В., Титов В.А., Долматова М.О., Озерова Н.В., Рашковская Н.Б.)

Из уравнений баланса массы и тепла определим параметры, влияющие на изменение влагосодержания материала при сушке

$$G_T W(z) + G x(z) = G_T W_n + G x_n, \quad (13)$$

$$G_T c_T(t) t(z) + G c(\theta) \theta(z) + G [x(z) - x_n] r(t) = G_T c_T(t_n) t_n + G c(\theta_n) \theta_n. \quad (14)$$

Принимая во внимание, что массовая концентрация материала (μ) в потоке равна G_T / G , после некоторых преобразований уравнений (13) и (14) получим

$$C_W(z) = \frac{W(z)}{W_n} = 1 - \frac{\mu [c_T(t_n) t_n - c_T(t) t(z)] + c(\theta_n) \theta_n - c(\theta) \theta(z)}{\mu r(t) W_n}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что относительное влагосодержание $C_W(z)$ является функцией следующих параметров

$$C_W(z) = f\left(\frac{c(\theta), c_T(t), t(z), \theta(z)}{\mu, r(t), W}\right). \quad (16)$$

Очевидно, что правая часть уравнения (16) также должна представлять собой безразмерный комплекс. Наиболее вероятным ее выражением будет

$$C_W(z) = f\left(\frac{c(\theta_n) \theta_n}{\mu W_n r(t_{M.T})}\right) = f(M). \quad (17)$$

Этот комплекс характеризует отношение общей тепловой мощности теплоносителя на входе в сушилку к максимальным затратам тепла на испарение заданного количества влаги. Выбор начальных параметров процесса обуслов-

лен тем, что они являются определяющими и обеспечивают тот или иной режим сушки. Температура материала, как следует из уравнений (13) и (14), также зависит от параметров (16).

Представление комплексного показателя M (17) в безразмерном виде снимает ограничение на одинаковость начальных влагосодержаний и поэтому ее можно рассматривать как инвариантную характеристику заданного режима сушки. Этот инвариант, в основном и определяет конечные показатели сушки.

Для уточнения зависимости (8) для мелкозернистого КСІ, полученной в лабораторных условиях, нами проведены обследования двух типов промышленных сушилок: ТС и ПС. Данные о взаимосвязи температуры и влагосодержания материала представлены на рис. 6.

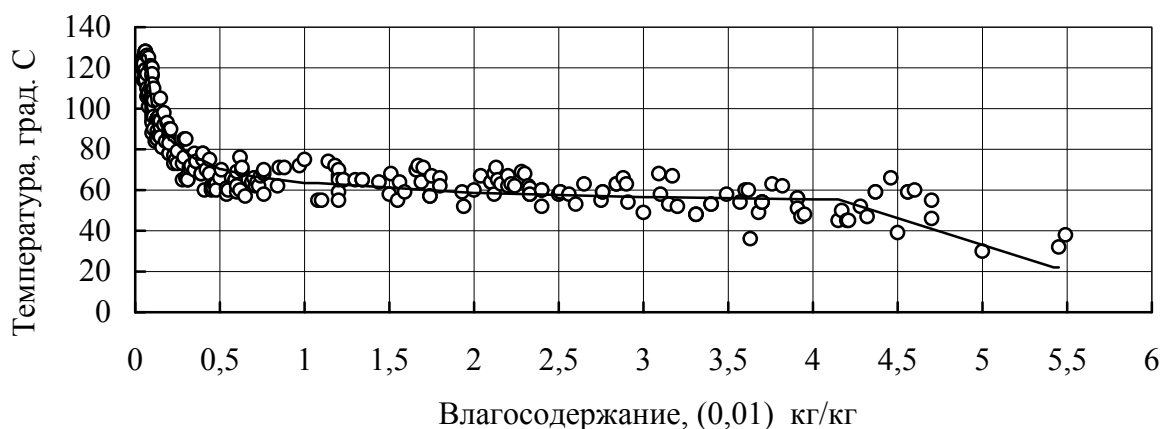


Рис. 6. Зависимость температуры КСІ от его влагосодержания

На полученной кривой имеются три участка. На первом из них в первые секунды нахождения материала в ТС наблюдается резкий скачок температуры материала от ~ 20 до ~ 55 °С. На втором участке интенсивность испарения влаги превалирует над ростом температуры. На третьем, наоборот, наблюдается резкое повышение температуры при малом изменении влагосодержания.

Для первого прямолинейного участка определена величина температурного коэффициента сушки b ($18,14 \pm 1,11$ °С/масс. %). Температура КСІ на этом участке может быть найдена по формуле: $t = t_n + b(W_n - W_i)$ (18). Для второго и третьего участков установлено уравнение

$$t = 48,39 + 1,19 W_i^{-0,55}. \quad (19)$$

Границе между вторым и третьим участками соответствует критическое

влажностное содержание, близкое к 0,007 кг/кг, при котором характер зависимости $t = f(W)$ резко меняется.

Для установления связи коэффициентов уравнения (19) с параметрами сушки проведены промышленные испытания на БКРУ-1 с определением значений влажностного содержания и температуры мелкозернистого КС1 по высоте ТС. В результате получены следующие зависимости

$$C_w(h_i) = [\exp(-k h_i / H)]^A, \quad (20) \quad t_i = (t_{M.T} - t_n) + B W_i^{-0,55}, \quad (21)$$

$$M = \frac{c_n \theta_n}{\mu W_n r(t_{M.T})}, \quad (22) \quad B = (0,29 M^2 - 0,53)^{0,5}, \quad (23)$$

$$k = 10,76 - 227,43 W_n + 2058,06 W_n^2, \quad (24) \quad A = 4,03 - 2,28 M + 0,39 M^2, \quad (25)$$

$$I = c_n \theta_n + x_n(r_n + c_{II} \theta_n), \quad (26)$$

$$t_{M.T} = 15,44 \ln I - 31,13, \quad \text{при} \quad I > 732,7 \text{ кДж/кг}, \quad (27)$$

$$t_{M.T} = 18,49 \ln I - 52,57, \quad \text{при} \quad I < 732,7 \text{ кДж/кг}. \quad (28)$$

Уравнения (18) и (21) позволяют найти граничную температуру между первым и вторым участками сушки. Выражения (20–25) справедливы в интервале: $\theta = 350 - 600$ °С; $W_n = 0,04 - 0,06$ кг/кг и $\mu = 1,5 - 2,0$ кг/кг.

При сушке КС1 решается внешняя задача, поэтому уравнение тепломассообмена в балансовой форме с учетом концентрации материала, затрат тепла на нагрев твердой фазы и испарение влаги можно выразить как

$$[\mu c_T t_n + \mu W_n c_{вп} t_n + c(\theta_n) \theta_n] K_{ном} = \mu c_T t(z) + \mu (W_n - W(z)) r_n + \mu (W_n - W(z)) c_{II} \theta(z) + c \theta(z). \quad (29)$$

Теплоту фазового перехода (r_n) обычно определяют по температуре кипения жидкости. Вследствие испарения в первом периоде до 80 % количества влаги температуру кипения целесообразно заменить на температуру мокрого термометра.

$$r = 2502 - 2,283 t_{M.T} - 0,0016 t_{M.T}^2. \quad (30)$$

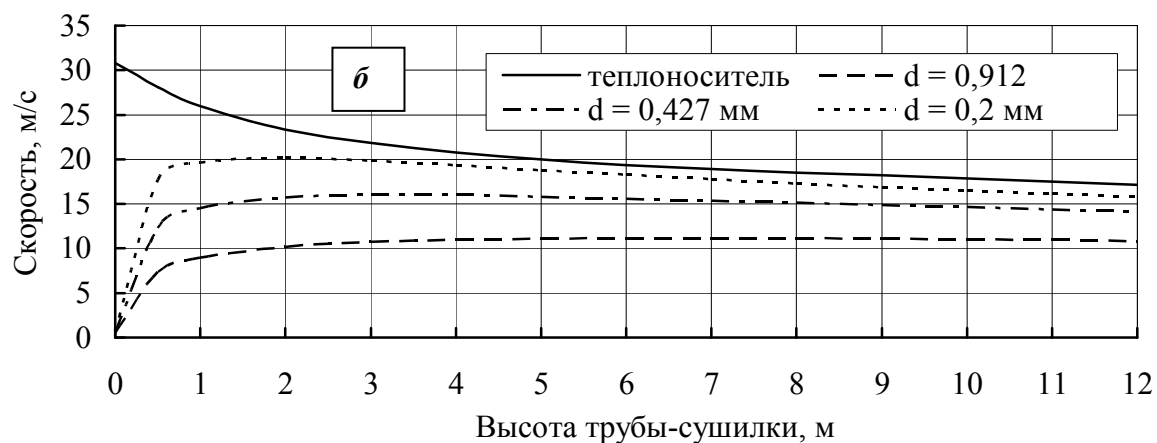
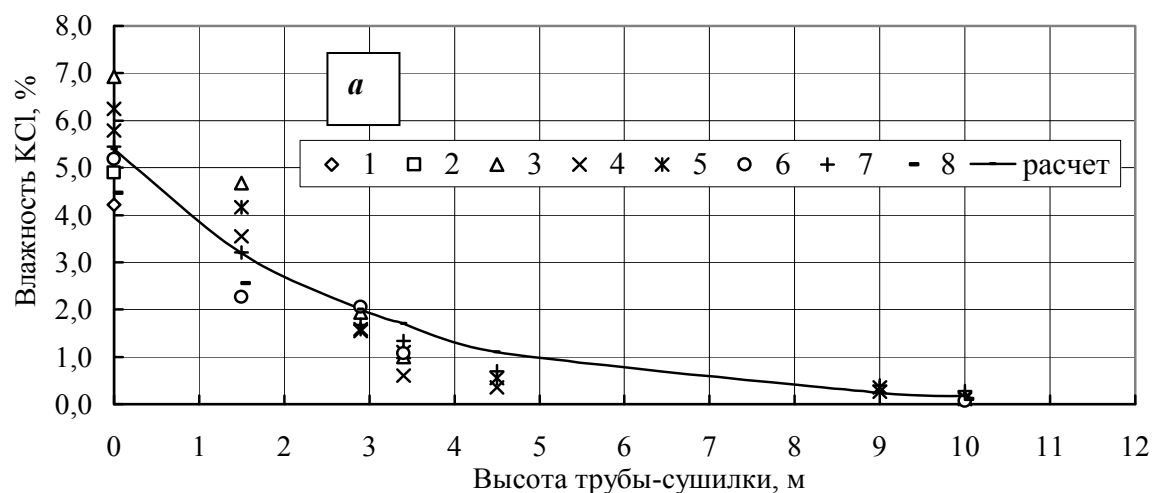
Как показывают расчеты, относительное число Рейнольдса ($Re_{отн}$) в промышленной ТС по высоте меняется мало и его можно определять по начальным параметрам процесса.

С учетом экспериментально полученного отношения $S_{мид} / m_T$ дифференциальное уравнение движения частиц в восходящем потоке приобретает следующий вид

$$\frac{dv_T}{dz} = \frac{0,377 \zeta \rho f^{0,5} (v - v_T)^2}{d_T v_T} - \frac{g}{v_T} - \frac{\lambda_{м.мп} \lambda v}{2 D}. \quad (31)$$

Таким образом, математическая модель сушки мелкозернистого КСІ в ТС может быть представлена уравнениями (18, 20–31). В результате решения этой модели при начальных условиях: $x = 0$; $v = v_n$; $\theta = \theta_n$; $t = t_n$; $W = W_n$ были определены графические зависимости изменения влажности, температуры КСІ, скорости движения частиц, теплоносителя по высоте ТС и сопоставлены с данными 8 опытов (рис. 7 а– в).

Согласно этим данным нестационарность движения двухфазного потока по высоте ТС (пульсации) может быть обусловлена снижением скорости частиц на расстояниях более трех – четырех диаметров трубы от точки ввода.



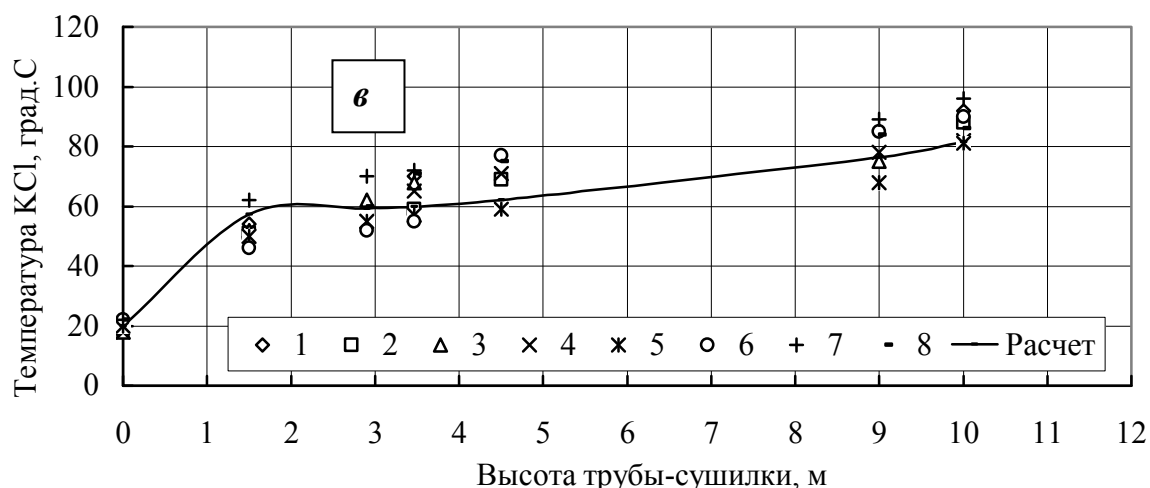


Рис. 7. Изменение влажности (а), скорости движения, (б) и температуры (в) частиц хлорида калия по высоте трубы-сушилки

Ошибка экспериментальных данных, определяемая по дисперсии воспроизводимости, для температуры KCl составила 5,67 °C, для влажности – 0,56 %.

Адекватность математической модели промышленным условиям по критерию Фишера при уровне значимости, равном 0,05, соблюдается.

Таким образом, полученные зависимости показывают возможность их использования для инженерных расчетов труб-сушилок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Уравнение движения двухфазного потока на разгонном участке вертикальной трубы выражается с учетом двух коэффициентов – лобового сопротивления и трения. Значение модифицированного коэффициента трения в восходящем потоке частиц определяется с учетом концентрации дисперсного материала, относительного критерия Рейнольдса и геометрических размеров трубы,

$$\lambda_{м.тр} = 0,5 Re_{отн}^{0,5} \mu^{0,2} (h/D)^{0,1} \exp(-4h/H)$$

2. Критическая влажность между периодами (0,97±0,08 масс. %) и их относительные коэффициенты сушки (0,981±0,016 и 1,038±0,047 1/масс. %) мало зависят от начальной влажности хлорида калия (2,59 – 8,10 %) и температуры теплоносителя (27 – 40 °C).

3. Интенсивность сушки хлорида калия в первом периоде оценивается кинетическим инвариантом ($N_1 \tau_1 = 0,8 W_n$), который можно использовать при проектировании сушильных аппаратов.

4. Уравнения, полученные при лабораторных исследованиях ($t = 51,08 + 1,09 W_i^{-0,55}$) и промышленных испытаниях ($t = 48,39 + 1,19 W_i^{-0,55}$), справедливы как для условий псевдоожижения, так и пневмотранспорта и отличаются друг от друга коэффициентами в среднем на 7,0 %.

5. Комплексный безразмерный показатель сушки $M = c_n \theta_n / (\mu W_n r(t_{M.T}))$, выражающий отношение общей тепловой мощности теплоносителя на входе в сушилку к максимальным затратам тепла на испарение заданного количества влаги, совместно с уравнениями гидродинамики, кинетики и теплового баланса позволяет определить температуру, влажность и скорость частиц хлорида калия по высоте трубы.

6. Пульсирующий характер движения восходящего двухфазного потока в промышленных трубах-сушилках обусловлен снижением скорости частиц на расстояниях более трех-четырех диаметров трубы от места ввода влажного материала.

7. Основу усовершенствованной математической модели составляют аналитические зависимости, установленные при промышленных испытаниях пневматической трубы-сушилки. Адекватность разработанной математической модели при уровне значимости, равной 0,05, выполняется.

8. По результатам выполненных исследований разработаны и внедрены на Березниковском ОАО «Уралкалий» модернизированные трубы-сушилки с интенсифицирующими внутренними устройствами с фактическим экономическим эффектом 71 тыс. руб. и Губахинском ОАО «Метафракс» – 497 тыс. руб.

Условные обозначения

t – температура материала, град.С; W , (C) – влагосодержание (концентрация влаги); кг влаги / кг сух. материала; θ – температура теплоносителя; U – влажность материала, масс.%; N_I – скорость сушки в первом периоде, масс. %/с; τ – время; λ_{TP} – коэффициент трения; $F_{ин}$, $F_{соп}$, $F_{тяж}$ – силы инерции, сопротивления и тяжести, соответственно н; $\xi_{л.с}$ – коэффициент лобового сопротивления; $\lambda_{м.тр}$ – модифицированный коэффициент трения; v_{Ti} , v – скорость i -ой частицы и теплоносителя, м/с;

ρ_T, ρ – плотность частиц и теплоносителя, кг/м³; ξ_i – коэффициент гидродинамического сопротивления i -ой частицы; $E_{\gamma i}$ – коэффициент осаждения частиц диаметрами d_γ и d_i ; $k_{\gamma i}$ – коэффициент восстановления нормальных составляющих скорости частиц диаметрами $d_{\gamma i}$ при взаимных соударениях; λ – коэффициент трения газа без твердой фазы; D – диаметр трубы, м; K_T – коэффициент Гастерштадта; ε – порозность двухфазного потока; P – давление, Па; μ – концентрация материала, кг/кг; h, H – текущая и общая высоты трубы, м; z – продольная координата, м; c и c_T – удельная теплоемкость газа и материала, кДж/(кг К); x – влагосодержание газа, кг/кг; r – теплота фазового перехода, кДж/кг; G, G_T – нагрузка по газу и материалу, кг/ч; b – температурный коэффициент, °С /%; K_{nom} – коэффициент потерь тепла; $t_{m.T}$ – температура мокрого термометра, °С; I – энтальпия теплоносителя, кДж/кг; M – комплексный показатель сушки; γ – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; d_T – диаметр твердой частицы, мм; m_T – масса твердой частицы, мг; g – ускорение свободного падения, м/с².

Индексы: «н» – начальное, «к» – конечное, «о» – опыт, «т» – твердое.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Даут В.А., Ожегов В.И., Загидуллин С.Х., Тимофеев И.Е. Опыт внедрения нового оборудования для кристаллизации, фильтрования и сушки пентаэритрита в Губахинском ПО «Метанол» // Пути совершенствования производства пентаэритрита: Сб. научн. тр. НИИХТ (г. Новосибирск). ЧФ НИИТЭХИМ, 1991. – С. 25 – 32.
2. Пашенко В.Н., Быков В.И., Шаймарданов В.Х., Тимофеев И.Е. Измельчение хлористого калия в процессе сушки. // Известия высших учебных заведений. Химия и хим. технология, 1980, – Т. 23. Вып. 2. – С. 231 – 234.
3. Тимофеев И.Е., Пашенко В.Н., Ложкин А.Ф., Коркин А.М., Зайнуллина А.Ш. Совершенствование процесса сушки хлористого калия в трубах-сушилках. // Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии. Тез. докл. Всесоюзного совещания. – Сумы, 1986. – С. 168.
4. Тимофеев И.Е., Пашенко В.Н., Калегин А.Д., Загидуллин С.Х. Исследование гидродинамических характеристик двухфазного потока на начальном

участке вертикальной трубы. Интенсивная механическая технология сыпучих материалов: Межвуз. сб. научн. тр. / Иван. хим.-технол. ин-т. – Иваново, 1990. – С. 118 – 122.

5. Тимофеев И.Е., Пашенко В.Н., Калегин А.Д., Загидуллин С.Х. Влагодержание и температура зернистого материала в математической модели сушки // Сб. научн. тр. XIII Междунар. научн. конф., С.-Петербург, 2000. Т. 3. – С. 70 – 71.

6. Тимофеев И.Е., Пашенко В.Н., Калегин А.Д., Тимофеев И.И. Влияние сепарирующих устройств в осадительной камере пневматической сушилки на эффективность использования тепла. Наука в решении проблем Верхнекамского промышленного региона. Сб. научн. тр. Вып. 2.–Березники, 2002.–С. 230 – 237.

7. Тимофеев И.Е., Загидуллин С.Х., Калегин А.Д., Тимофеев И.И. О некоторых закономерностях конвективной сушки хлористого калия // Сб. научн. трудов ПГТУ, т. II. Пермь. Проблемы и перспективы химической промышленности на Западном Урале, 2003 г. – С. 5 - 11.

8. Тимофеев И.Е., Загидуллин С.Х., Калегин А.Д., Тимофеев И.И. Изучение некоторых закономерностей сушки технического хлористого калия. // Химическая промышленность, 2005. № 12. – С. 610 – 615.

9. Тимофеев И.Е., Загидуллин С.Х., Мошев Е.Р., Шестаков Е.А., Тимофеев И.И. Математическое описание сушки зернистого материала в пневматической трубе // Сб. научн. статей I Международной НТК. Аналитические и численные методы моделирования естественнонаучных и социальных проблем. Пенза, 2006. – С. 206 – 210.

10. А.с. 1382100 СССР, МКИ F26 В 17/10. Сушилка для зернистых материалов / А.М. Коркин, В.И. Городецкий, Н.Ф. Зайцев, А.М. Вахрушев, Б.П. Харин, В.Н. Пашенко, И.Е. Тимофеев. Заявка № 3945902.

11. А.с. 1288470 СССР, МКИ F26 В 17/10. Установка для конвективной сушки. В.Н. Пашенко, И.Е. Тимофеев, А.Ш. Зайнуллина, В.А. Бабушкин, В.Д. Фот, А.М. Коркин. Заявка № 3727068.