

На правах рукописи

ИГОШИН Дмитрий Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНО-ДИФфуЗИОННЫХ
РЕЖИМОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕПЛОВИМ ВОЗДЕЙСТВИИ
НА ВЛАЖНЫЕ ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2010

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии им. Зайнаб Биишевой.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Шагапов Владислав Шайхулагулович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук
Ильясов Урал Рафкатович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Кислицын Анатолий Александрович,

кандидат физико-математических наук
Киреев Виктор Николаевич

Ведущая организация: Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

Защита состоится «15» апреля 2010 г. в 15 час на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу 625003, г.Тюмень, ул. Перекопская, 15-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета по адресу 625003, г.Тюмень, ул. Семакова, д.10.

Автореферат разослан «12» Марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент



Мусакаев Наиль Габсалямович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Процессы переноса во влажных пористых средах при тепловом воздействии важны с точки зрения сушки, которая широко распространена во многих отраслях народного хозяйства: химико-лесной комплекс, сельское хозяйство, пищевая, строительных материалов, кожевенная, легкая и другие. При этом жидкость предварительно удаляют более дешевыми механическими способами, окончательно — тепловыми. Сушка влажных материалов отличается высокой энергоемкостью, что связано как со значительными объемами испаряемой влаги, так и с большой удельной теплотой ее испарения.

Применяемые в промышленности виды сушилок сильно различаются по технологическим признакам: давлению (атмосферные и вакуумные), периодичности процесса, способу подвода тепла (конвективные, контактные, радиационные, с нагревом токами высокой частоты), роду сушильного агента (воздушные, газовые, сушилки на перегретом паре), направлениям движения материала и сушильного агента (прямоточные и противоточные) и т. д. В связи с этим остро встает вопрос об эффективности тех или иных режимов сушки. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию процессов сушки (Лыков, Сажин, Акулич), необходимо систематическое параметрическое исследование диффузионного и диффузионно-конвективного режимов удаления влаги из материала.

Цель работы:

- анализ влияния условий сушки и параметров пористой среды на динамику диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса;
- теоретическое изучение процессов, происходящих при сушке пористых материалов, насыщенных водой, и моделирование сушки в технологическом реакторе (ленточная сушилка).

Научная новизна. Наиболее важные результаты следующие:

- решены автомодельные задачи о сушке пористой среды в диффузионном приближении и с учетом конвективного переноса, задача о сушке пористой среды конечного размера, и построены решения, описывающие распределения основных термодинамических параметров в среде;
- показано, что в зависимости от исходных параметров пористой среды, насыщенной водой, на границе раздела сухой и влажной зон может возникать максимум влагосодержания либо минимум температуры;
- установлено, что диффузионный механизм переноса доминирует над конвективным при мягких режимах сушки.
- предложена математическая модель процесса сушки пористого ленточного материала в секционной сушилке.
- установлены основные закономерности процесса сушки влажного пористого материала в зависимости от исходного влагосодержания, скорости ленты, соотношения тепловых мощностей калориферов по секциям сушилки и объемного расхода вытяжных вентиляторов;

Достоверность результатов диссертации основана на использовании фундаментальных уравнений механики многофазных систем, обусловлена корректной постановкой задач, а также получением решений, не противоречащих общим термодинамическим представлениям и согласующихся в случае задачи о ленточной сушилке с производственными данными для основного режима функционирования.

На защиту выносятся:

- 1) Результаты решения задачи о сушке пористой среды бесконечной протяженности, первоначально насыщенной жидкостью, при условиях допускающих автоматизированную постановку.
- 2) Результаты решения задачи о сушке пористой среды конечных размеров, насыщенной жидкостью.
- 3) Математическая модель процесса сушки ленточного материала в секционной сушилке

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на следующих конференциях и научных школах:

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях и научных школах:

- III Всероссийская научно–теоретическая конференция «ЭВТ в обучении и моделировании» (Бирск, 2004)
 - X Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-10, Москва, 2004)
 - IV Региональная школа–конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2004)
 - IV Региональная научно-практическая конференция "ЭВТ в обучении и моделировании" (Бирск, 2005)
 - Российская конференция "Механика и химическая физика сплошных сред" (Бирск, 2007)
 - Всероссийская конференция молодых ученых “Неравновесные процессы в сплошных средах” (Пермь, 2007)
 - Всероссийская научно-практическая конференция “Информационные технологии в высшей и средней школе” (Нижневартовск, 2008)
 - Международная конференция, посвященная 100-летию памяти академика Халила Ахмедовича Рахматуллина “Современные проблемы газовой и волновой динамики” (Москва, 2009)

Кроме того, результаты работы докладывались и получили положительную оценку на научных семинарах кафедры прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии под руководством член-корр. АН РБ, д.ф.-м.н. Шагапова В. Ш. и д.ф.-м.н. Гималтдинова И. К. (2003–2009 гг.)

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 126 стр. в том числе 28 рис. Список литературы состоит из 120 наименований.

В первой главе проведен литературный анализ вопросов тепломассопереноса при сушке пористых сред.

Во второй главе диссертации рассмотрены задачи тепломассопереноса при сушке пористой среды, насыщенной водой: автомодельные задачи о сушке пористой среды в диффузионном приближении и с учетом конвективного переноса; задача о сушке пористой среды конечной толщины.

В третьей главе диссертации рассмотрена задача о функционировании ленточной сушилки.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в девяти работах, список которых приведен в конце автореферата.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отмечена практическая и научная актуальность проблем, рассмотренных в работе. Сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** выполнен обзор исследований, посвященных изучению процессов сушки. В частности рассматриваются теоретические, экспериментальные работы, а также работы, посвященные функционированию сушильных установок.

Во **второй** главе рассмотрены одномерные задачи о сушке пористого материала.

В п. **2.1** рассмотрена задача о сушке пористой среды с учетом конвективного переноса. Система уравнений, описывающих тепло- и массоперенос, состоит из уравнений неразрывности для воды и пара, воздуха, кинематических соотношений для потока массы и скоростей фаз, закона Фика, уравнения тепла, условие постоянства полного давления, уравнения состояния для фаз и условия насыщения пара во влажной зоне

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(m(1-S_1)\rho_v + mS_1\rho_l)}{\partial t} + \frac{\partial(m(1-S_l)\rho_v v_v)}{\partial x} = 0, \\
& \frac{\partial(m(1-S_1)\rho_a)}{\partial t} + \frac{\partial(m(1-S_l)\rho_a v_a)}{\partial x} = 0, \\
& \rho_g = \rho_v + \rho_a, \quad \rho_g v_g = \rho_v v_v + \rho_a v_a, \\
& v_v = v_g + w_v, \quad v_a = v_g + w_a, \quad \rho_v w_v = -D \frac{\partial \rho_v}{\partial x}, \\
& \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + m(1-S_1)\rho_g c_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + mL\rho_l \frac{\partial S_1}{\partial t}, \\
& p_g = p_v + p_a = \text{const}, \quad p_i = \rho_i \frac{R}{\mu_i} T, \quad (i = a, v) \\
& p_v = p_* \exp\left(-\frac{T_*}{T}\right) \quad (x_{(s)} \leq x < \infty).
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\rho x = (1-m)\rho_m c_m + m\rho_l c_l S_1$, $\lambda = (1-m)\lambda_m + m\lambda_l S_1$. Приведенные выше уравнения необходимо дополнить соотношениями на подвижной границе ($x = x_{(s)}$), следующими из условий баланса массы и тепла

$$\begin{aligned}
& \rho_g(1-S_{l(s)})\left(v_g^+ - \dot{x}_{(s)}\right) - \rho_g\left(v_g^- - \dot{x}_{(s)}\right) = \rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}, \quad \dot{x}_{(s)} = \frac{dx_{(s)}}{dt}, \\
& \rho_v(1-S_{l(s)})\left(v_v^+ - \dot{x}_{(s)}\right) - \rho_v\left(v_v^- - \dot{x}_{(s)}\right) = \rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}, \\
& \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^+ + \rho_g c_g v_g^+ T - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^- - \rho_g c_g v_g^- T = mL\rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Пусть в исходном состоянии пористая среда содержит жидкость с объемным влагосодержанием S_{l0} и находится при температуре T_0 . Внутрипоровое давление будем полагать равным атмосферному. На границе ($x = 0$) пористая среда начинает обдуваться паровоздушной смесью с температурой T_e и парциальной плотностью пара ρ_{ve} . С учетом вышеотмеченного начальные и граничные условия запишем в виде

$$\begin{aligned}
& S_1 = S_{l0}, \quad T = T_0, \quad v_g = 0, \quad (x \geq 0, t = 0), \\
& \rho_v = \rho_{ve}, \quad T = T_e, \quad (x = 0, t > 0).
\end{aligned} \tag{3}$$

В п. 2.2 получено автомодельное решение задачи. Автомодельная переменная и безразмерная скорость введены в виде

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{\kappa}}, \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad V(\xi) = v_g \sqrt{t/\kappa}.$$

В п. 2.3 рассмотрена задача о сушке пористой среды в диффузионном приближении. Система уравнений, описывающих тепло- и массоперенос, состоит из уравнений неразрывности для воды и пара, закона Фика, уравнения тепла и условия насыщения пара во влажной зоне

$$\frac{\partial(m(1-S_1)\rho_v + mS_1\rho_l)}{\partial t} + \frac{\partial(m(1-S_1)j_v)}{\partial x} = 0,$$

$$j_v = -D \frac{\partial \rho_v}{\partial x}, \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + mL\rho_l \frac{\partial S_1}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\rho_v = \frac{\mu_v p^*}{RT} \exp\left(-\frac{T^*}{T}\right), \quad (x_{(s)} \leq x < \infty).$$

Запишем балансовые соотношения на подвижной границе ($x = x_{(s)}$)

$$(j_v^+ - \rho_v \dot{x}_{(s)})(1 - S_{l(s)}) - (j_v^- - \rho_v \dot{x}_{(s)}) = \rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)},$$

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^+ - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{(s)}^- = mL\rho_l S_{l(s)} \dot{x}_{(s)}, \quad \dot{x}_{(s)} = \frac{dx_{(s)}}{dt}. \quad (5)$$

Начальные и граничные условия запишем в виде

$$S_1 = S_{10}, \quad T = T_0, \quad (x \geq 0, \quad t = 0),$$

$$\rho_v = \rho_{ve}, \quad T = T_e, \quad (x = 0, \quad t > 0). \quad (6)$$

В п. 2.4 рассмотрена автомодельная постановка выше приведенной задачи в диффузионном приближении. Безразмерная температура и плотность имеют вид

$$\Theta = \frac{T}{T_0}, \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho_v}{\rho_{v0}}.$$

Получено аналитическое решение для системы (4) в сухой зоне

$$\tilde{\rho} = \tilde{\rho}_e + (\tilde{\rho}_{(s)} - \tilde{\rho}_e) \int_0^{\xi} \exp(-\xi^2/Le) d\xi \bigg/ \int_0^{\xi_{(s)}} \exp(-\xi^2/Le) d\xi, \quad \tilde{\rho}_{(s)} = \frac{\rho_{v(s)}}{\rho_{v0}},$$

$$\Theta = \Theta_e + (\Theta_{(s)} - \Theta_e) \int_0^{\xi} \exp(-\xi^2) d\xi \bigg/ \int_0^{\xi_{(s)}} \exp(-\xi^2) d\xi, \quad \Theta_{(s)} = \frac{T_{(s)}}{T_0}. \quad (7)$$

Для влажной зоны ($\xi_{(s)} < \xi < \infty$) система (4) преобразована к виду, удобному для численного интегрирования.

В п. 2.5 проведен анализ результатов. На рис. 1 представлены распределения основных величин в пористой среде, полученные при различных значениях температуры. Для параметров, характеризующих исходное состояние пористой среды, здесь и далее приняты следующие значения $m=0.5$, $p=0.1$ МПа, $p^*=1.1 \cdot 10^5$ МПа, $T^*=5186$ К, $\rho_l=1000$ кг/м³, $c_l=4200$ Дж/(кг К), $\rho_r=925$ кг/м³, $c_r=1000$ Дж/(кг К), $\lambda_r=0.15$ Вт/(м К), $\lambda_l=0.65$ Вт/(м К), $L=2.26 \cdot 10^6$ Дж/кг, $D=3 \cdot 10^{-5}$ м²/с. На рисунках 1–4 решения с учетом конвективного переноса показаны сплошными линиями, в диффузионном приближении — штриховыми. Из рисунка видно, что основной перепад температур реализуется в ближней сухой зоне, а во влажной зоне тепло расходуется на фазовые переходы. На границе сухой и влажной зон ($\xi = \xi_{(s)}$) средняя плотность пара максимальна, а это приводит к тому, что диффузионный поток с границы зон направлен как наружу, так и внутрь. Это, наряду с удалением влаги из материала, приводит к ее частичному транспорту вглубь, при этом наблюдается увеличение влагосодержания на границе зон (линии 1 и 2). Следует отметить, что в диффузионном приближении при сушке холодным воздухом (линия 3) на границе зон образуется температурный минимум, т.к. в этом случае фазовые переходы происходят частично за счет запаса внутренней энергии. Конвективный перенос оказывает хоть и заметное, но не решающее влияние на усиление интенсивности процесса сушки влажного пористого материала. Подвижная граница $\xi_{(s)} = 0.21$ расположена правее, чем в диффузионном приближении $\xi_{(s)} = 0.17$, что составляет различие порядка 25%. Максимум влагосодержания на подвижной границе также более ярко выражен

$$S_{l(s)} = 0.534$$

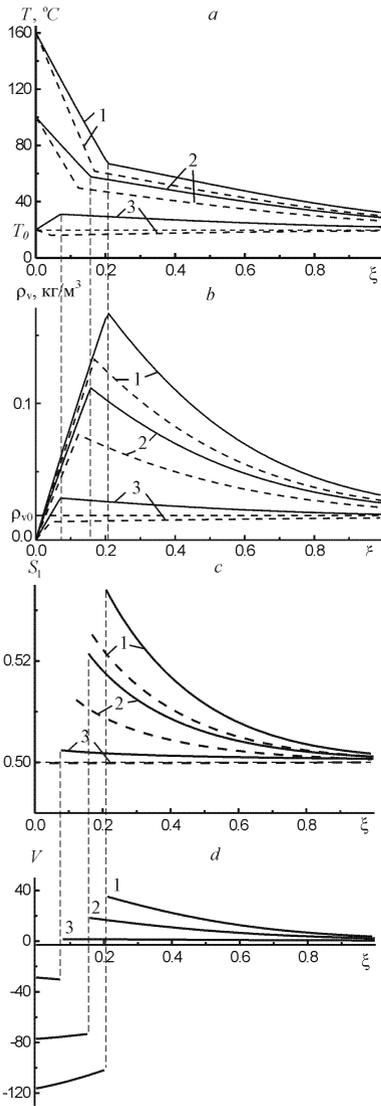


Рис.1 Распределения температур, пара, плотности и скорости газа при начальном влагосодержании $S_{10}=0.5$ при различных внешних температурах $T_e=160$ (1), 100 (2) и 20°C (3).

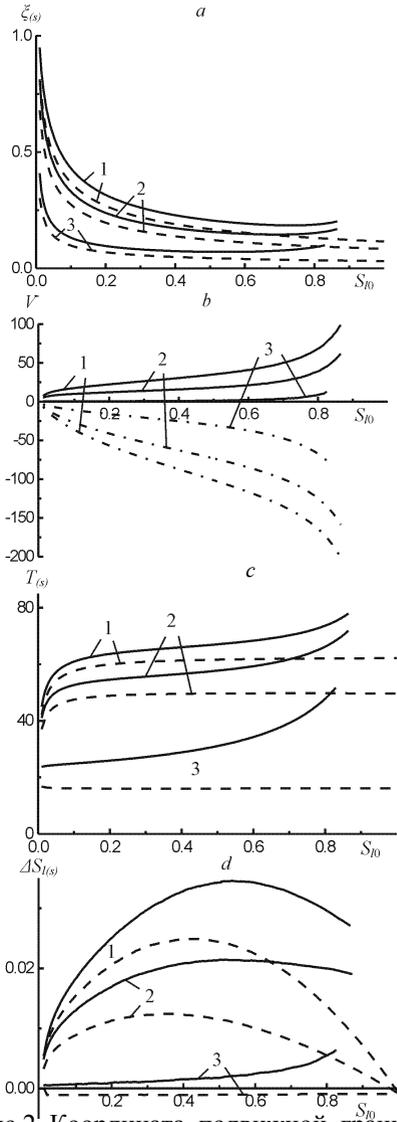


Рис.2 Координата подвижной границы, скорость газа слева (штрихпунктирная линия) и справа от нее, температура и разность объемных влагосодержаний на ней в зависимости от исходного влагосодержания. $T_e=160$ (1), $T_e=100$ (2), $T_e=20^\circ\text{C}$ (3).

Решения в диффузионном приближении показаны пунктиром

о сравнению с в диффузионном приближении. Из рисунка видно, что ма совый поток пара с подвижной границ

Влияние исходного влагосодержания на интенсивность процессов переноса представлено на рис. 2. Из рисунка видно, что координата подвижной границы падает с ростом S_{10} , причем наиболее интенсивно это происходит при малых значениях S_{10} . Температура подвижной границы существенно растет с увеличением исходного влагосодержания лишь при малых значениях S_{10} (линии 1 и 2). Вызвано это тем, что подвижная граница быстро перемещается и не успевает прогреться до высокой температуры. В случае холодного воздуха на внешней границе (линия 3) температура $T_{(s)}$ практически не зависит от S_{10} . Максимум влагосодержания на границе зон имеет наибольшее значение при $S_{10} \approx 0.6$ для $T_e = 160^\circ\text{C}$ (линия 1), при $S_{10} \approx 0.5$ для $T_e = 100^\circ\text{C}$ (линия 2). Объясняется это тем, что при малых значениях S_{10} влагосодержание не растет из-за нехватки влаги, а при больших значениях S_{10} снижается “живая” пористость $m(1 - S_1)$ во влажной зоне, что приводит к ослаблению транспорта пара.

Зависимость основных параметров, описывающих процесс сушки от исходной температуры T_0 , представлено на рис. 3. Наблюдается слабое увеличение (не более 10%) глубины проникновения подвижной границы с ростом T_0 . Это хорошо согласуется с тем, что на фазовые превращения тратится около 90% подводимого тепла, остальное — на прогрев среды. Видно, что температура на подвижной границе растет с увеличением T_0 . Из рисунка можно определить, что температурный минимум реализуется для $T_e = 160^\circ\text{C}$ при $T_0 > 70^\circ\text{C}$, для $T_e = 100^\circ\text{C}$ при $T_0 > 50^\circ\text{C}$, а для $T_e = 20^\circ\text{C}$ существует всегда. Это связано с тем, что при большей внешней температуре фазовые переходы осуществляются интенсивнее. Наиболее заметно это при больших значениях исходной температуры, что приводит к охлаждению материала на подвижной границе. Из рисунка видно, что максимум влагосодержания для случаев с высокой внешней температурой (линии 1 и 2) не наблюдается там, где формируется температурный минимум. Происходит это потому, что при таких режимах сушки происходит интенсивное испарение на подвижной границе, приводящее к охлаждению материала. В случае низкой внешней температуры (линия 3) тепло на испарение поступает из горячих глубоких слоев материала, диффузионный поток направлен наружу, т.к. плотность пара монотонно растет с глубиной. Пар, попадая в холодное наружное пространство, охлаждается и конденсируется, что приводит к повышению влагосодержания на подвижной границе

Аналогичные зависимости от массовой концентрации пара на внешней границе ($\xi=0$) приведены на рис.4. Из рисунка хорошо видно наличие

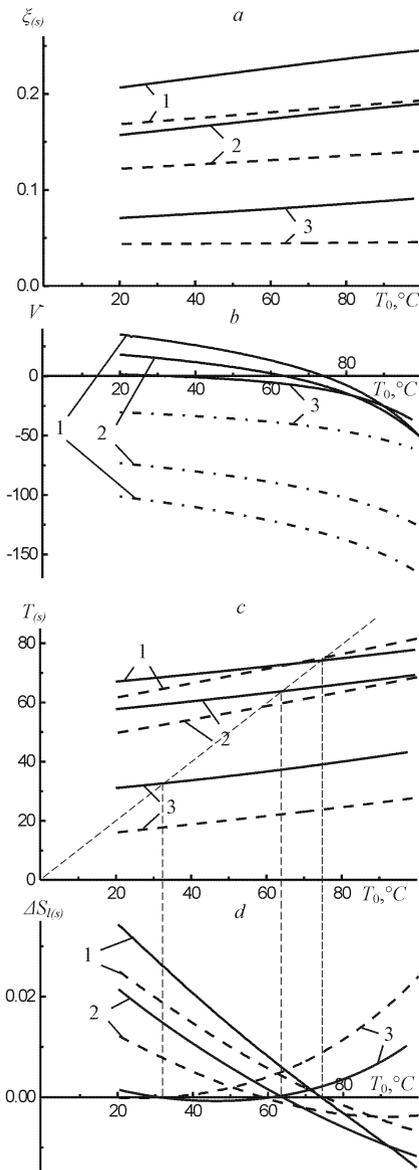


Рис.3.

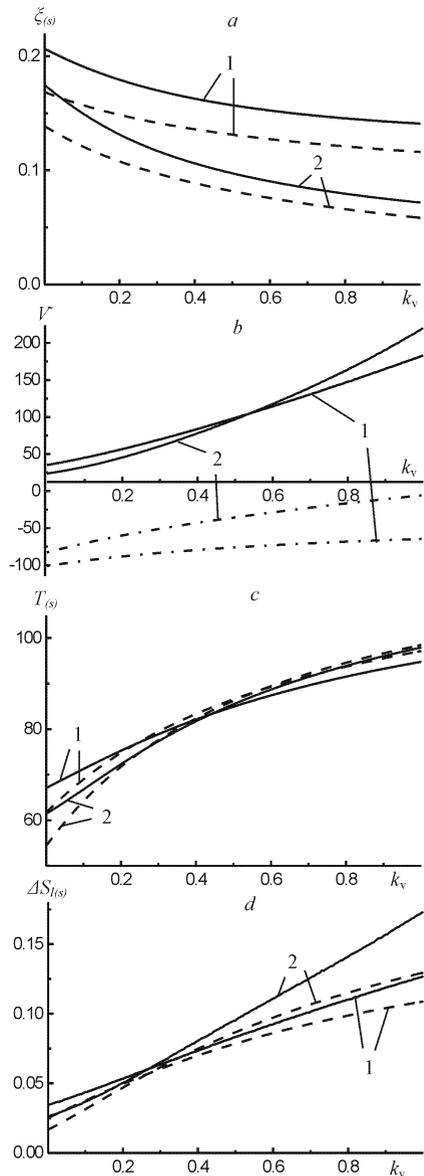


Рис.4.

Координата подвижной границы, скорость газа слева (штрихпунктирная линия) и справа от нее, температура и разность влагосодержаний на ней в зависимости от исходной температуры (Рис.3. $T_c=160^\circ\text{C}$ (1), $T_c=100^\circ\text{C}$ (2), $T_c=20^\circ\text{C}$ (3)) и внешней концентрации пара (Рис.4. $T_c=160^\circ\text{C}$ (1), $T_c=120^\circ\text{C}$ (2)). Решение в диффузионном приближении показано пунктиром

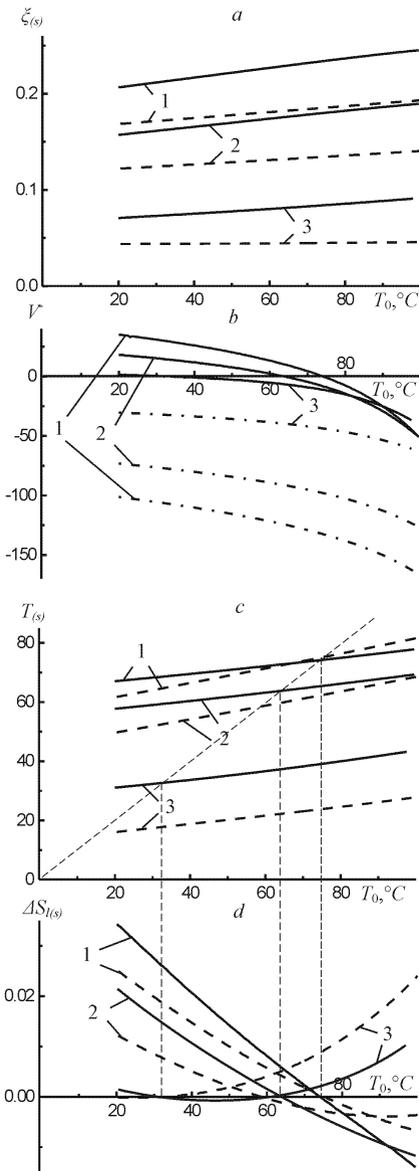


Рис.3.

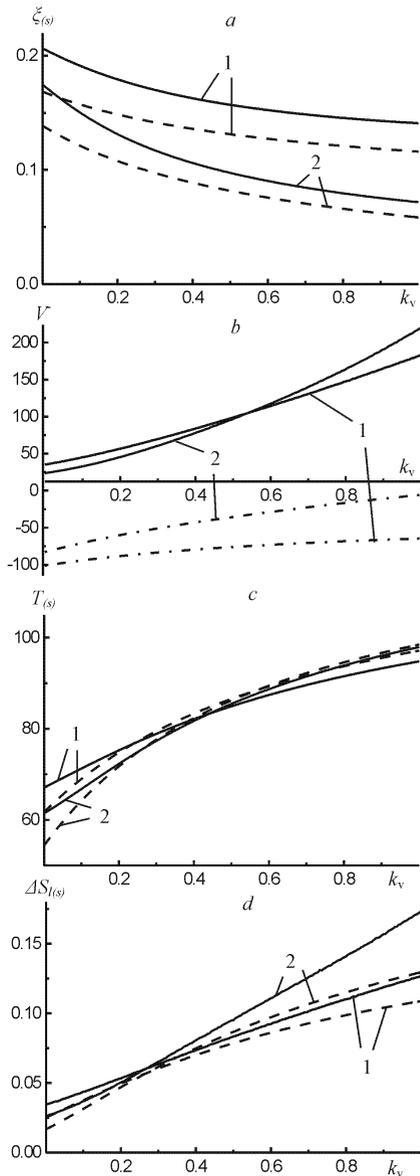


Рис.4.

Координата подвижной границы, скорость газа слева (штрихпунктирная линия) и справа от нее, температура и разность влагосодержаний на ней в зависимости от исходной температуры (Рис.3. $T_c=160^\circ\text{C}$ (1), $T_c=100^\circ\text{C}$ (2), $T_c=20^\circ\text{C}$ (3)) и внешней концентрации пара (Рис.4. $T_c=160^\circ\text{C}$ (1), $T_c=120^\circ\text{C}$ (2)). Решение в диффузионном приближении показано пунктиром

вособразной инверсии температуры подвижной границы и максимума влагосодержания на ней при увеличении k_{ve} от 0 до 1. Этот эффект состоит в том, что при малых k_{ve} большему значению T_e соответствует большее значение $T_{(s)}$ а также $S_{1(s)} - S_{10}$, при k_{ve} близком к 1 зависимость обратная. Температурная инверсия наблюдается при $k_{ve}=0.45$, инверсия максимума влагосодержания — при $k_{ve}=0.25$.

Из рисунков 1 — 4 видно, что конвективный перенос увеличивает интенсивность теплообмена примерно на 25% вне зависимости от исходных параметров среды и внешнего воздействия кроме режимов, когда исходное влагосодержание близко к 1. В этом случае в рамках модели с однородным давлением учет конвективного переноса становится некорректным, т.к. в этом случае, с уменьшением “живой” пористости расчетное значение скорости газовой фазы неограниченно растет. Для физически корректного решения задачи необходимо учитывать гидродинамическое сопротивление среды, т.е. использовать фильтрационную модель переноса.

В п. 2.6 рассмотрена динамика процессов переноса при сушке пористой среды конечных размеров. Задачу, сформулированную в (4) – (6), необходимо дополнить условиями на правой границе

$$\frac{dT}{dx} = 0 \quad (x = d) \quad (8)$$

Поставленная краевая задача относится к классу нелинейных краевых задач математической физики. Поскольку данная задача определена в областях с неизвестной подвижной границей, будем использовать метод ловли фронта в узел сетки, так как он позволяет аккуратно следить за перемещениями искомой границы. Основная идея данного метода заключается в том, что до момента, когда температурное возмущение достигнет правой границы, распределения влагосодержания и температуры аппроксимируются автомодельным решением. После этого очередной шаг временной сетки вычисляется в ходе решения поставленной задачи совместно с равновесными значениями влагосодержания и температуры.

В п. 2.7 проведен анализ результатов. На рис.5 для случая $T_0=20^\circ C$, $S_{10}=0.5$, $T_e=160^\circ C$, $k_{ve}=0$ приведено сравнение положения координаты подвижной границы $x_{(s)}$, среднего влагосодержания по материалу S_{INT} , температуры $T_{(s)}$ и влагосодержания $S_{l(s)}$ на подвижной границе, полученных для автомодельной задачи (пунктирная линия) и задачи в конечном слое (сплошная линия). Время, через которое температура материала на глубине $d=5\text{мм}$ начинает отличаться от исходной более чем на $1^\circ C$, при коэффициенте температуропроводности $\kappa=1.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ составляет примерно 13с (первый период). В следующие 25–30с она достигает $30^\circ C$ (рис.5.с), что немного замедляет транспорт тепла и пара во влажной зоне и приводит к уменьшению влагосодержания на подвижной границе. В результате подвижная граница достигает менее прогретых слоев с

температурой 50°C. С этого момента скорость ее продвижения существенно

П

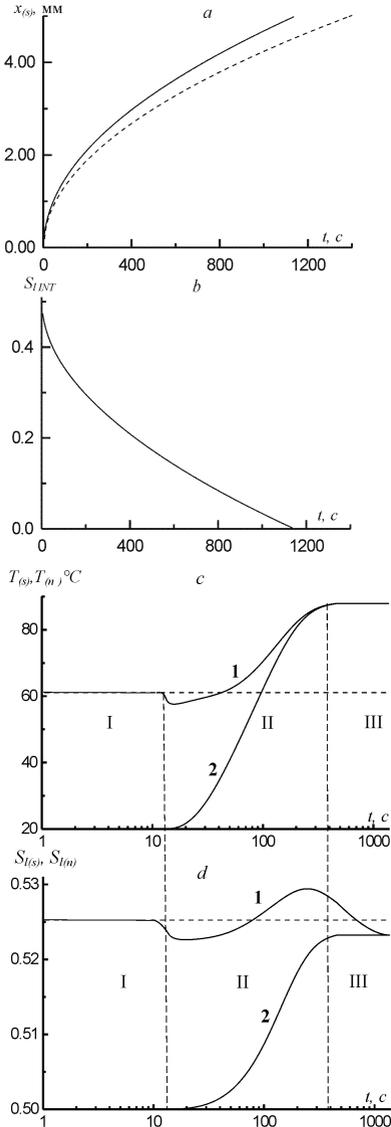


Рис.5. Координата подвижной границы, среднее влагосодержание, температура и разность объемных влагосодержаний на подвижной границе (1) и в глубине материала (2) в зависимости от времени.

Автомодельное решение показано пунктиром

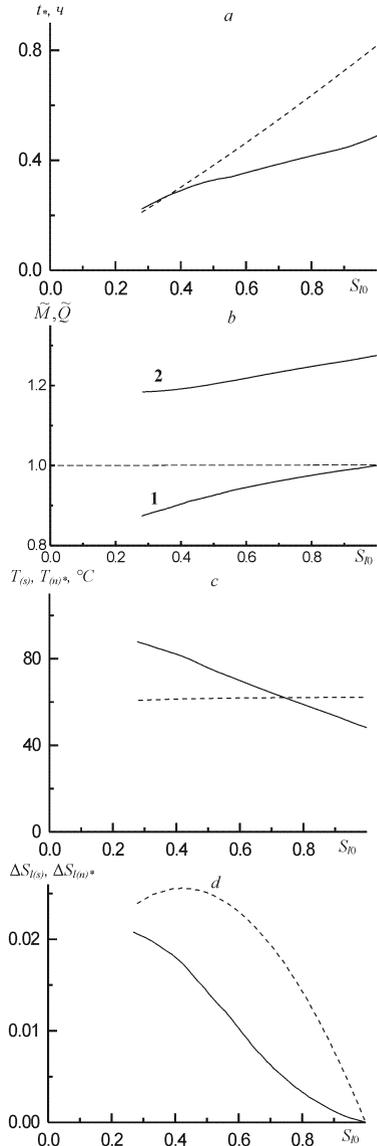


Рис. 6. Время сушки, приведенные масса (1) и теплота (2), температура и разность объемных влагосодержаний на подвижной границе к концу процесса сушки в зависимости от исходного влагосодержания.

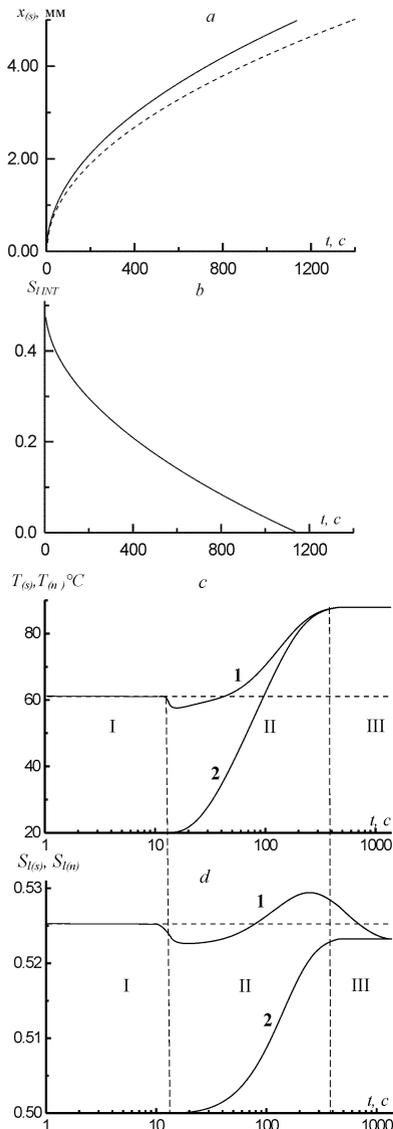


Рис.5. Координата подвижной границы, средняя влагосодержание, температура и разность объемных влагосодержаний на подвижной границе (1) и в глубине материала (2) в зависимости от времени.

Автомодельное решение показано пунктиром

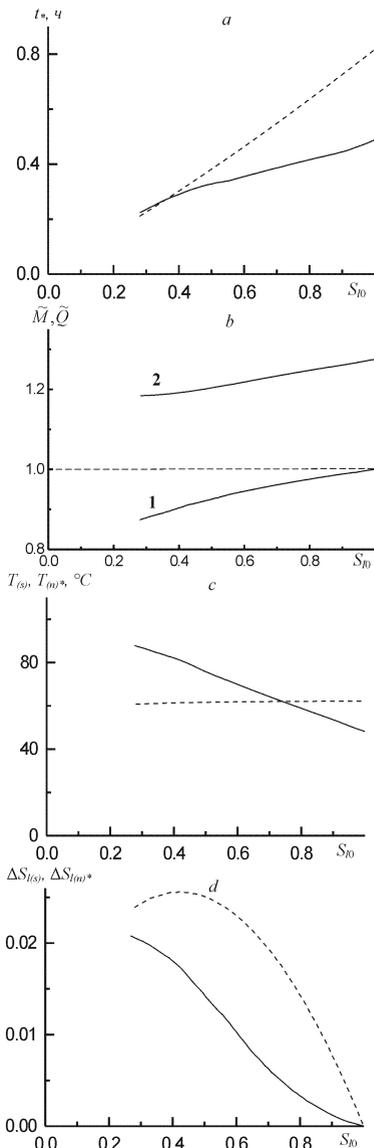


Рис. 6. Время сушки, приведенные масса (1) и теплота (2), температура и разность объемных влагосодержаний на подвижной границе к концу процесса сушки в зависимости от исходного влагосодержания.

адает, выравнивание температур во влажной зоне происходит за время порядка 200 , а прогрев всей влажной зоны в целом — за 400с (второй период). алее все тепло, подводимое к подвижной границе, идет на испарение воды и установившейся температуре около 77°C (третий период). Транспорт пара во влажной зоне к этому времени заканчивается, а выравнивание влажностей на подвижной границе и в глубине происходит исключительно за счет их сближения. Среднее влагосодержание со временем снижается все более медленными темпами. Это свидетельствует об уменьшении интенсивности процесса сушки. Из рисунка видно, что время сушки материала конечной толщины существенно меньше (порядка 20%), чем время образования сухой зоны такого же размера в автомобильном случае. Э

На рис.6. представлены основные характеристики процесса сушки для случая $T_0=20^\circ\text{C}$, $k_{\text{вс}}=0$, $T_e=160^\circ\text{C}$ в зависимости от исходного влагосодержания S_0 . Приведенной массой \tilde{M} будем называть отношение массы воды, удаленной из полубесконечной пористой среды через проницаемую границу ($x=0$) на момент времени, когда размер сухой зоны равен толщине конечного слоя d , к массе воды, удаленной из материала толщины d . Аналогично вводится приведенная теплота \tilde{Q} с той лишь разницей, что тепло через границу ($x=0$) проникает внутрь пористой среды. Видно, что с увеличением влагосодержания время сушки растет. Причем, различие между решением в конечном слое и автомобильным становится более существенным. Вызвано это тем, что увеличение исходного влагосодержания требует большего расхода тепла на прогрев среды. Следует отметить, что с ростом исходного влагосодержания уменьшается “живая” пористость во влажной зоне, в связи с чем фазовые переходы в ней практически прекращаются, реализуется фронтальная схема испарения на подвижной границе. Это ведет к тому, что температура на этой границе падает и становится ниже, чем в полубесконечном слое. В случае, когда исходное влагосодержание близко к 1, максимум влагосодержания отсутствует как в автомобильном случае, так и в задаче для конечного слоя.

В третьей главе Предложена математическая модель процесса сушки пористого ленточного материала в секционной сушилке. При известных параметрах сушильной установки: ее геометрических размерах, мощности калориферов, задавая граничные условия на ее входе и на выходе (температуры и массовые расходы фаз; размеры ленты и пористость материала, содержание влаги) и решая краевую задачу, можно определить термо- и гидродинамическую обстановку в сушильной камере (распределение температур, влагосодержаний). В ходе решения принимаются следующие допущения: пар, жидкость и пористый скелет имеют одинаковую температуру, кроме того, полагаем, что пористый скелет и жидкость несжимаемы, жидкость неподвижна.

Уравнения сохранения массы и баланса тепла для ленты и воды запишем в виде:

$$\frac{dM_t}{dx} = 0, \quad \frac{dM_l}{dx} = -J_{gt}, \quad M_t = (1-m)bh\rho_l v_t, \quad M_l = mbh\rho_l v_t S_l, \quad (9)$$

$$(c_t M_t + c_l M_l) \frac{dT_t}{dx} = q_{gt} - J_{gt} L,$$

где m — пористость материала, c — удельная теплоемкость, M — массовый расход, нижние индексы g, l, t соответствуют газу (*gas*), жидкости (*liquid*) и ленте (*tape*), b, h и v_t — ширина, толщина и скорость ленты, S_l — объемное влагосодержание, q_{gt} и J_{gt} — интенсивности тепло- и массопереноса между лентой и газом, отнесенные к единице длины ленты.

Соотношения для массовых расходов компонент газовой фазы, уравнения сохранения массы и баланса тепла для ленты, воды и газа в i -й секции сушилки запишем в виде

$$M_a = k_{ai} M_{gi}, \quad M_a = const, \quad M_{vi} = k_{vi} M_{gi}, \quad M_{gi} = M_a + M_{vi}, \quad k_{ai} + k_{vi} = 1,$$

$$M_{vi} - M_{vi+1} = M_{li} - M_{li+1},$$

$$(c_t M_t + c_l M_{li+1})(T_{ti+1} - T_{ti}) + (c_a M_a + c_v M_{vi+1})(T_{gi} - T_{gi+1}) + (M_{li} - M_{li+1})[c_l(T_k - T_{ti}) + L + c_v(T_{gi} - T_k)] = N_i, \quad (10)$$

где N_i — тепловая мощность калориферов i -й секции, T_k — температура кипения воды ($T_k = 100^\circ C$).

Тепло- и массообмен между газом и лентой запишем с учетом сопротивления обеих фаз

$$q_{gt} = \beta_{gt}^{(T)}(T_g - T_t), \quad \frac{1}{\beta_{gt}^{(T)}} = \frac{1}{\beta_{g\sigma}^{(T)}} + \frac{1}{\beta_{\sigma t}^{(T)}}, \quad \beta_{g\sigma}^{(T)} = \frac{2b\lambda_g}{h_g^{(T)}},$$

$$h_g^{(T)} = \sqrt{\frac{\kappa_g b}{2v_g}}, \quad \kappa_g = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g}, \quad \beta_{\sigma t}^{(T)} = \frac{4b}{h}(\lambda_t(1-m) + \lambda_t m S_l), \quad (11)$$

$$J_{gt} = -J = \beta_{gt}^{(M)}(k_v - k'_v), \quad \frac{1}{\beta_{gt}^{(M)}} = \frac{1}{\beta_{g\sigma}^{(M)}} + \frac{1}{\beta_{\sigma t}^{(M)}},$$

$$\beta_{g\sigma}^{(M)} = \frac{2b\rho_g D_g}{h_g^{(M)}}, \quad h_g^{(M)} = \sqrt{\frac{D_g b}{2v_g}}, \quad \beta_{\sigma t}^{(M)} = \frac{4b}{h} \rho'_g D'_g m(1 - S_l).$$

Для парогазовой смеси в порах примем закон Дальтона, компоненты парогазовой смеси будем считать калорически совершенным газом, давление насыщенного пара должно удовлетворять условию равновесия с жидкостью, следующему из уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$p = p' = p'_a + p'_v, \quad p_i = \rho_i R_i T_i, \quad (12)$$

$$p'_v = p_* \exp(-T_*/T_t).$$

Запишем условия на входе и на выходе сушилки, определяющие режим ее эксплуатации. Лента входит в сушилку при атмосферной температуре с заданными массовыми расходами материала и воды и объемным влагосодержанием. Снизу в сушилку подается атмосферный воздух и выходит высушенный материал:

$$T_t = T_{t0} = T_0, \quad M_1 = M_{10}, \quad (x = 0)$$

$$T_g = T_{ge} = T_0, \quad k_a = k_{ae}, \quad (x = x_e) \quad (13)$$

Пренебрегая влажностью атмосферного воздуха, с учетом условия полного высыхания ленты запишем

$$M_{v0} = M_{10}, \quad k_{v0} = 1 + \frac{\mu_a}{\mu_v} \left(\frac{\mu_v p V}{M_{v0} R T_{v0}} - 1 \right)^{-1}, \quad (14)$$

где V — объемный расход вытяжных вентиляторов.

При этом на выходе сушилки ($x = x_e$) останется лишь одно краевое условие $T_g = T_{ge}$. Такую задачу, с одним краевым условием на выходе, можно решить методом “пристрелки” по входной температуре газа $T_g = T_{g0}$.

Результаты, приведенные ниже, получены при моделировании работы секционной ленточной сушилки, установленной в цехе Е2 ЗАО “Каучук” г. Стерлитамак. Сушилка разделена на 4 секции: в первой (верхней) секции размещены 5 горизонтальных транспортеров, во второй — также 5, в третьей — 7, в четвертой — 2. Количество калориферов и циркуляционных вентиляторов по секциям соответственно равно 8, 8, 4, 0. Лента и воздух подаются в сушилку при температуре окружающей среды: $T_{10} = T_{10} = T_{ge} = 20^\circ\text{C}$. Объемный расход выходящей из сушилки парогазовой смеси $V = 3.5 \text{ м}^3/\text{с}$. Характерные скорости газа, циркулирующего по секциям, взяты из оценки производственных режимов ленточной сушилки: $v_{g1} = 10 \text{ м/с}$, $v_{g2} = 10 \text{ м/с}$, $v_{g3} = 5 \text{ м/с}$, $v_{g4} = 0.1 \text{ м/с}$. Мощности калориферов N_i распределены в следующем соотношении: $K_1 = 0.55$, $K_2 = 0.4$, $K_3 = 0.05$, $K_4 = 0$, где $K_i = N_i/N$. Длина одного транспортера $l_i = 27 \text{ м}$, ширина ленты $b = 2.0 \text{ м}$, толщина ленты $h = 0.4 \text{ см}$, скорость движения ленты $v_t = 0.17 \text{ м/с}$, пористость каучука $m = 0.5$.

Поскольку на входе в сушилку лента находится при температуре окружающей среды, то, как видно из рис.1, концентрация паров воды в порах меньше их концентрации в выходящем потоке горячего газа. Это приводит к некоторой конденсации воды на ленте. По мере прогрева ленты концентрация пара в порах повышается и начинается испарение. Отличие численных и экспериментальных значений влагосодержания в начале сушилки связано с тем, что при непосредственном измерении влагосодержания эта влага стряхивается, а также с усреднением температуры ленты по толщине.

В зависимости от начального влагосодержания температура ленты в секции может стабилизироваться на различных значениях. При $S_{10}=0.9$ (рис. 7) в силу малой “живой” пористости $m' = m(1 - S_1)$ диффузионный массообмен на этапе прогрева затруднен, поэтому подводимое снаружи тепло идет в основном на прогрев ленты, температура которой довольно быстро достигает T_k и нагревание прекращается, испарение переходит в кипение. При этом все подводимое тепло, поступающее от газа к ленте, идет на парообразование. По

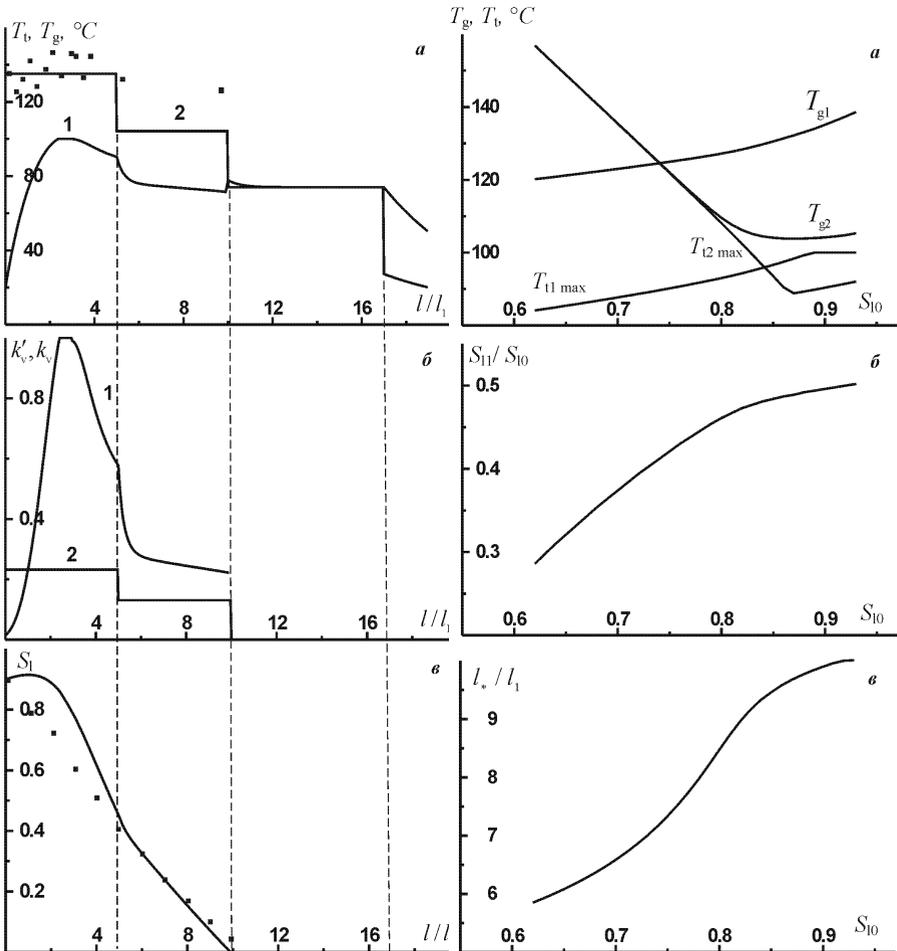


Рис.7. Распределения температур, концентраций пара и влагосодержания по длине ленты при начальном влагосодержании $S_{10}=0.9$, линия 1 соответствует ленте, 2 — газу. Пунктирными линиями отмечены границы секций.

Рис.8. Распределение максимальных температур ленты и температур газа по секциям ($i=1,2$), доли воды, оставшейся в ленте после первой зоны и координаты высушивания ленты в зависимости от начального влагосодержания.

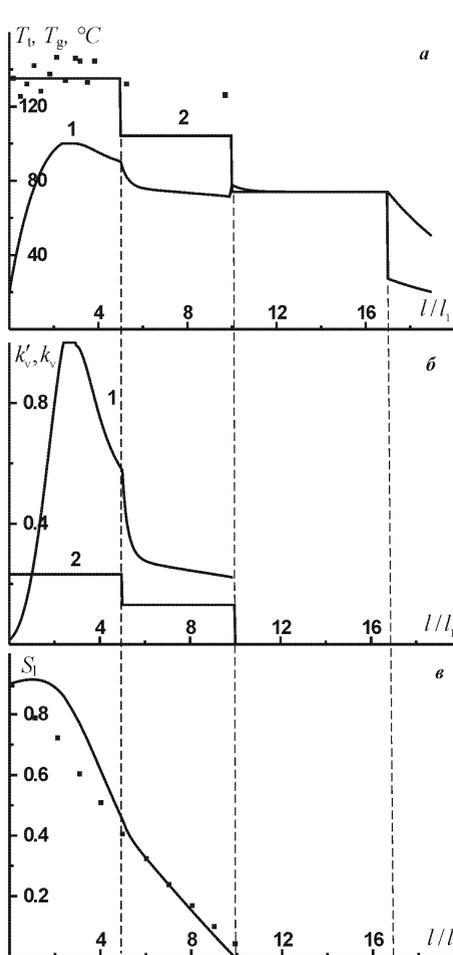


Рис.7. Распределения температур, концентраций пара и влагосодержания по длине ленты при начальном влагосодержании $S_{10}=0.9$, линия 1 соответствует ленте, 2 — газу. Пунктирными линиями отмечены границы секций.

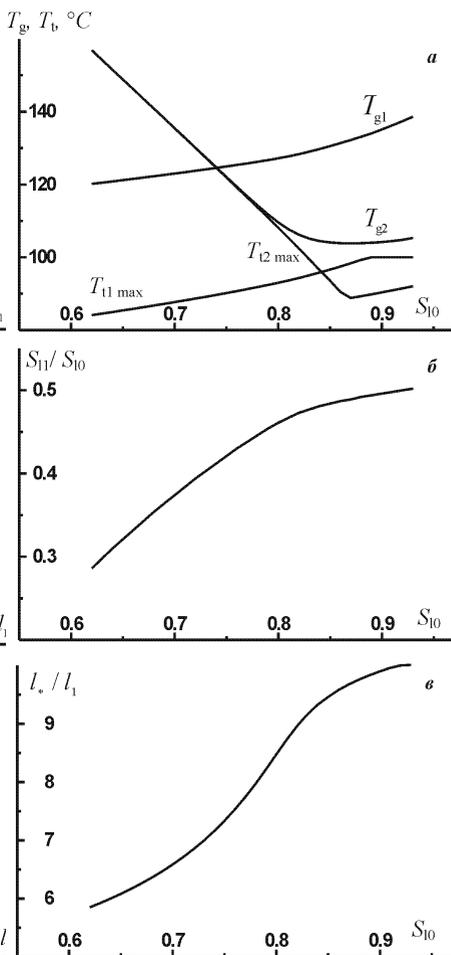


Рис.8. Распределение максимальных температур ленты и температур газа по секциям ($i=1,2$), доли воды, оставшейся в ленте после первой зоны и координаты высыхания ленты в зависимости от начального влагосодержания.

ере высушивания материала “живая” пористость увеличивается. Это приводит тому, что уменьшается теплообмен, т.к. он идет и по материалу, и по жидкости. Кроме того, увеличивается диффузионный массообмен. При этом лента даже начнет охлаждаться. При меньшем начальном влагосодержании $S_{10}=0.8$ по

указанным причинам температура ленты во время сушки в первой зоне так и не достигает T_k .

Важно отметить, что при увеличении начального влагосодержания S_{10} происходит рост эффективной мощности калориферов согласно (рис.8.). Это можно объяснить тем, что при большем S_{10} в газе увеличивается массовая концентрация пара. Поскольку теплоемкость пара примерно в два раза больше теплоемкости воздуха, паровоздушная смесь снимает с калориферов больше тепла, чем поток сухого воздуха. Тем самым обеспечивается более интенсивный тепло- и массообмен с лентой.

Во второй секции в силу меньшего теплообмена наблюдается дальнейшее охлаждение ленты и полное высыхание, после чего ее температура достаточно быстро выравнивается с температурой газа. В третьей секции практически вся энергия калориферов тратится на прогрев холодного воздуха поступающего снизу. В четвертой зоне происходит охлаждение ленты до приемлемой температуры 50°C и незначительный прогрев газа, поступающего снизу при температуре окружающей среды.

С увеличением начального влагосодержания температура газа в первой зоне непрерывно растет (рис.8.а). Это связано с тем, что процесс сушки требует больше энергии, а в первой зоне он идет наиболее интенсивно. При малых значениях S_{10} температура газа во второй секции существенно выше температуры газа в первой секции. Поскольку при этом режиме основная часть воды испаряется уже в первой секции (рис.8.б) и энергия калориферов второй секции тратится в меньшей степени на испарение и в большей на нагрев газа. Это, в свою очередь, приводит к более высокому теплообмену между газом и лентой, быстрому ее досушиванию (рис.8.в) и перегреву во второй секции (рис.8.а).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Рассмотрены задачи тепломассопереноса, описывающие сушку влажного пористого материала. Получены численные и автомодельные решения в диффузионном приближении, а также с учетом конвективного переноса.

1. Анализ решений автомодельных задач показал следующее:

- вблизи подвижной границы, разделяющей сухую и влажную зоны, возможен рост влагосодержания с образованием максимума на самой границе. Этот эффект вызван тем, что поток пара с границы раздела направлен как наружу, так и вглубь материала, где происходит его охлаждение и конденсация. Величина превышения влагосодержания на подвижной границе над исходным значением растет с увеличением температуры и концентрации пара на внешней границе среды, но имеет немонотонную зависимость от исходного влагосодержания с максимумом, положение которого ($S_{10}=0.5\div 0.7$) определяется внешними условиями;

- при исходной температуре среды, близкой к температуре кипения воды, на подвижной границе реализуется температурный минимум. Это связано с тем, что поток газа по всей толще материала направлен наружу и приводит к интенсивным фазовым переходам вблизи границы раздела, требующим больших затрат тепла, которое берется из самой среды;

- при сушке паром большему значению внешней температуры соответствует меньшее значение температуры и максимума влагосодержания на границе раздела. Это объясняется тем, что положение границы имеет прямую зависимость от внешней температуры. Например, для внешней температуры $T_e=160^\circ\text{C}$ граница находится в 2 раза глубже, чем при $T_e=120^\circ\text{C}$ и расположена в менее прогретых слоях;

- для задачи в диффузионном приближении для различных начально-граничных условий можно определить области существования решений, не противоречащих условию постоянства давления газа в среде.

2. Получено численное решение задачи о сушке пористой среды конечного размера методом “ловли” фронта в узел сетки.

- Показано наличие трех периодов сушки: начальный, на котором динамика процессов переноса совпадает с автомоделным решением; переходный, сопровождающийся выравниванием температур во влажной зоне; заключительный — при постоянной температуре на фронте.

- Установлено, что время сушки конечного слоя, как правило, меньше, чем время образования сухой зоны такого же размера в неограниченной среде, т.к. тепло, подводимое с внешней границы, в большей степени идет на испарение и в меньшей — на прогрев материала. Эта закономерность нарушается для двух случаев: если концентрация пара на внешней границе близка к 1, то во влажной зоне со временем устанавливается высокая температура, что ослабляет тепловой поток снаружи; если исходная температура среды близка к температуре кипения воды, то быстро прекращается подвод тепла из глубины.

3. Разработана математическая модель функционирования ленточной сушилки. Адекватность модели работы сушилки проверена сопоставлением с производственными данными, предоставленными ЗАО “Каучук”. Показано как качественное, так и количественное соответствие результатов численных расчетов и производственных данных. Анализ влияния технологических параметров на режим работы сушилки показал, что повышение производительности сушилки возможно путем увеличения скорости ленты при условии значительной интенсификации процесса сушки. Этого можно добиться перераспределением мощности калориферов между секциями, увеличивая в первой секции за счет второй, или увеличением объемного расхода вытяжных вентиляторов, но при этом для предотвращения перегрева ленты необходимо понизить мощность калориферов первой секции за счет увеличения второй.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Игошин Д.Е. Моделирование конвективной сушки каучука // Сб. тезисов ВНКСФ-10, Москва, 2004, С. 335-337.
2. Игошин Д.Е. Математическое моделирование конвективной сушки каучука // ЭВТ в обучении и моделировании: сб. тезисов III всероссийской научно-теоретической конференции, Бирск 2004, С 77-80.
3. Игошин Д.Е. Математическое моделирование сушки каучука // Сб. тезисов IV региональной школы-конференции, Уфа 2004, С 80.
4. Игошин Д.Е. Сушка пористого слоя, насыщенного влагой. // ЭВТ в обучении и моделировании: сб. тезисов IV региональной научно-практической конференции, Бирск 2005, Ч.1. С 271-276.
5. Игошин Д.Е. Ильясов У.Р. Математическое моделирование сушки влажного пористого материала // Неравновесные процессы в сплошных средах: материалы всероссийской конференции молодых ученых. — Пермь, 2007, С 194-197.
6. Ильясов У.Р., Игошин Д.Е. Компьютерное моделирование сушки пористых материалов // Информационные технологии в высшей и средней школе: материалы всероссийской научно-практической конференции. — Нижневартовск: НГГУ, 2008, С. 248-251.
7. Ильясов У.Р., Игошин Д.Е. Математическое моделирование сушки влажного пористого материала в диффузионном приближении. // Теплофизика и Аэромеханика, 2008 Т.15, №4. С. 689-697. (Ilyasov U.R. and Igoshin D.E. Mathematical modelling of damp porous material drying in diffusion approximation. Thermophysics and Aeromechanics, 2008, Vol. 15, No. 4. С. 689-697.)
8. Игошин Д.Е. Автомодельная задача о сушке пористого материала // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН: — Уфа, 2008, С 75-81.
9. Игошин Д.Е. Учет конвекции в тепломассопереносе при сушке пористых материалов // Современные проблемы газовой и волновой динамики: сб. тезисов международной конференции, посвященной 100-летию памяти академика Халила Ахмедовича Рахматуллина. — М.: МГУ им. Ломоносова, 2009, С. 43-44.

Подписано в печать 10.03.2010
Гарнитура “Times”. Бумага ксероксная. Формат 60×80_{1/16}.
Печать оперативная. Усл.-печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии
Стерлитамакской государственной педагогической академии
им. Зайнаб Бишевой:
453103, Стерлитамак, пр. Ленина, 49