

На правах рукописи

07

СЕМЕНИХИН Олег Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИГРО- И ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ КАПИЛЛЯРНОПОРИСТЫХ КОЛЛОИДНЫХ
МАТЕРИАЛОВ (РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ
И ИНТЕНСИФИКАЦИИ)**

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж - 1998

Работа выполнена на кафедре промышленной энергетики Воронежск
государственной технологической академии

Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. Харин В.М.
Научный консультант	кнд. техн. наук, доц. Шишацкий Ю.И.
Официальные оппоненты:	д-р техн. наук, проф. Ефимочкин А.Ф.
	кнд. техн. наук, доц. Сотникова О.А.
Ведущая организация	кафедра энергетики и гидравлики ВГЛТА

Защита состоится " 17 " декабря 1998 г. в 14⁰⁰ часов на заседа
нии диссертационного совета Д 063.81.05 при Воронежском государственной
техническом университете (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, кон
ференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского госу
дарственного технического университета.

Автореферат разослан " 12 " Ноября 1998 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



— Бариков А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Многие из окружающих человека предметов являются капиллярнопористыми коллоидными телами: почва, строительные материалы, почти все продукты питания человека и животных, большинство продуктов химической промышленности и смежных с ней отраслей. Находясь в естественных и искусственно созданных условиях в контакте с газопарожидкостной средой, в частности - влажным воздухом, паром или водой, такие тела обмениваются с ней влагой и теплотой. Эти процессы обобщенно называют гигро- и гидротермическими. К ним относятся, например, сушка, увлажнение, обжарка, варка, ошпаривание и т. д. "Пористое" охлаждение, применяемое в ракетно-космической технике, по существу также является гигро- и гидротермическим процессом. Несмотря на широкую распространенность в природе, технике и технологии и очевидную значимость указанных процессов для жизни и хозяйственной деятельности людей, их систематизированной теории до сих пор не создано. Известны более или менее совершенные теории отдельных технологических операций, из них теория сушки разработана в наибольшей степени. Однако и эта теория в современном ее состоянии не описывает адекватно ряда важных явлений, наблюдаемых при сушке, что затрудняет моделирование и оптимизацию процесса. Известные модели кинетики набухания и отбухания ограничены изотермическими условиями, которые в реальных гидротермических процессах, как правило, не выдерживаются. Слабо развиты и методы экспериментального определения гидроскопического равновесия и, особенно, коэффициентов внутридиффузионного переноса влаги, что подтверждается отсутствием литературных данных об этих свойствах для многих материалов. В данной работе различные гигро- и гидротермические процессы исследуются с единых теоретических позиций.

Работа выполнялась в соответствии с комплексным планом научно-исследовательских работ Воронежской государственной технологической академии (гос. рег. № 01960007320).

Целью работы является создание математических моделей, методов расчета и экспериментального исследования, а также оптимизации и интенсификации гигро- и гидротермических процессов.

Задачи исследования: математическое описание внешнего и внутреннего влаго- и теплопереноса в системе "капиллярнопористое тело - среда"; моделирование кинетики гигро- и гидротермических процессов, разработка методов их оптимизации и интенсификации; разработка методики экспериментального исследования гидроскопических и диффузионных свойств пористых материалов.

Научная новизна: 1) решена задача внешнего конвективного влаго- и теплообмена капиллярнопористого тела с однофазной газопаровой средой с учетом влияния массового потока пара на поверхности тела; 2) получены новые уравнения для расчета давления насыщенного водяного пара и влагосодержания воздуха, насыщенного водяным паром; 3) предложен метод расчета температуры "мокрого" термометра и постоянной скорости поверхностного испарения; 4) сформулирована и решена задача приближенного математического описания внутренне-

го влаго- и теплопереноса в капиллярнопористых коллоидных телах; 5) разработана модель нестационарного процесса сушки перегретым паром, учитывающая особенности начальной стадии процесса, связанные с прогревом тела и конденсацией влаги на его поверхности; 6) предложен метод оптимизации процесса паровой сушки термочувствительных материалов; 7) решена задача кинетики гидротермической обработки капиллярнопористых коллоидных тел с учетом неизотермичности процесса; 8) предложен метод экспериментального исследования гидроскопических свойств и внутридиффузионного переноса влаги в капиллярнопористых коллоидных телах с ограниченной способностью набухания, с помощью этого метода получены данные о равновесных гидроскопических влагосодержаниях и коэффициентах диффузии влаги для некоторых продуктов; 9) предложен способ интенсификации процесса гидротермической обработки.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенные математические модели и методы расчета позволяют оптимизировать и интенсифицировать гидро- и гидротермическую обработку различных материалов как на действующих промышленных установках, так и на вновь проектируемых. В настоящее время на Бутурлиновском мясокомбинате ведутся работы по переоборудованию пароварочной камеры в установку для гидротермической обработки мясоспродуктов способом орошения пароводяной смесью по предложенному нами способу. Отдельные результаты работы используются в учебном процессе в курсах "Техническая термодинамика" и "Теплопередача".

Апробация работы: основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XXXV и XXXVI отчетных научных конференциях (Воронеж, ВГТА, 1997, 1998), региональном межвузовском семинаре "Процессы теплообмена в энергомашиностроении (Воронеж, ВГТУ, 1998).

Публикации. По теме диссертации имеется 6 публикаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации: 168 страниц машинописного текста, включая 1 таблицу, 20 рисунков, список литературы из 96 наименований и приложения.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируется цель исследования, характеризуется научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указываются вопросы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена решению задачи внешнего конвективного влаго- и теплообмена капиллярнопористого коллоидного тела с однофазной газопаровой средой с учетом нормальной составляющей скорости потока среды на поверхности тела, обусловленной испарением или конденсацией влаги. Исходя из законов Фика и Фурье с учетом соотношений Максвелла-Стефана и основных представлений "пленочной" теории, получены выражения для массового и теплового потоков на поверхности тела:

$$j = -\rho k^*(x_c - x_F), \quad q = j h_2 (T_F) - \alpha^* (T_c - T_F), \quad (1)$$

где

$$k^* = \beta \frac{x_c + \mu_2/\mu_3}{(x_c + 1)(x_F - x_c)} \ln \left(\frac{x_F + \mu_2/\mu_3}{x_c + \mu_2/\mu_3} \right), \quad (2)$$

$$\alpha^* = j c_2 / [\exp(j c_2 / \alpha) - 1], \quad (3)$$

α, β - "условные" коэффициенты тепло- и массоотдачи, определяемые с помощью известных критериальных зависимостей типа

$$\text{Nu} = K \text{Re}^m \text{Pr}^n, \quad \text{Sh} = K \text{Re}^m \text{Sc}^n, \quad (4)$$

отражающих аналогию между процессами переноса теплоты и вещества при малой скорости массообмена.

В этой же главе на основе уравнений Клапейрона-Клаузиуса и Клапейрона-Менделеева получены формулы для расчета давления насыщенного пара воды

$$p_S(t) = p_t t^{-A} \exp[B(1-t^{-1}) - C(1-t)] \quad (5)$$

и влагосодержания воздуха в состоянии насыщения

$$x_S(p, t) = \frac{\mu_2/\mu_3}{(p/p_t) \cdot t^{-A} \exp[-B(1-t^{-1}) + C(1-t)] - 1}, \quad (6)$$

где $A = 9.248$, $B = 27.098$, $C = 2.005$ - безразмерные постоянные, найденные по данным Международной скелетной таблицы 1963 г. "Термодинамические свойства воды и водяного пара на линии насыщения" (на интервале $273.15 \text{ K} < T < 500 \text{ K}$ расчетные значения p_S отличаются от упомянутых табличных не более, чем на 0.1 %).

С помощью формул (1) - (6) получены уравнения для расчета температуры "мокрого" термометра T_m и постоянной скорости поверхностного испарения j_m :

$$t_c - t_m = \frac{r_m}{c_2 T_t} \left[\left(\frac{x_m + \mu_2/\mu_3}{x_c + \mu_2/\mu_3} \right) \left(\frac{a}{D} \right)^{n-1} \frac{x_c + \mu_2/\mu_3}{x_c + c_3/c_2} - 1 \right]; \quad (7)$$

$$j_m = \frac{\alpha}{c_2} \left(\frac{a}{D} \right)^{n-1} \frac{x_c + \mu_2/\mu_3}{x_c + c_3/c_2} \ln \left(\frac{x_m + \mu_2/\mu_3}{x_c + \mu_2/\mu_3} \right), \quad (8)$$

где $x_m = x_S(p, t_m)$, $r_m = r_t [1 + P(t_m - 1) + Q(t_m - 1)^2]$, P, Q - безразмерные постоянные (для воды $P = -0.2224$, $Q = -0.1201$).

Адекватность решения задачи внешнего влаго- и теплообмена проверена сопоставлением результатов расчета с известными экспериментальными данными ВНИИМП, полученными при гигротермической обработке (подсушке, обжарке и варке) колбасных изделий.

Вторая глава посвящена математическому описанию внутреннего влаго- и теплопереноса. Объективная оценка адекватности описания внешнего влаго- и теплообмена дает значение допустимой погрешности $\approx 20\%$, поэтому представляется вполне оправданным не предъявлять более жестких требований и к строгости описания внутреннего переноса, а сознательно пойти на определенные издержки в его точности и степени детализации ради упрощения задачи. Первые шаги в этом направлении сделаны А.В. Лыковым при выводе "интегральных уравнений тепло- и влагообмена" путем применения теоремы Гаусса-Остроградского не к элементарно малому, а к полному объему тела. Эти уравнения уже не содержат частных производных потенциалов переноса по координатам, а включают только обыкновенные производные первого порядка среднеобъемных потенциалов по времени и усредненные по поверхности тела плотности внутренних потоков влаги и теплоты

$$j_k^0 = -\omega_{F0} \left(D_k^0 \nabla_F u + D_{Tk} \nabla_F T + D_{pk} \nabla_F p \right), \quad (9)$$

$$q^0 = \sum_{k=1}^2 j_k^0 h_k(T_F) - \lambda^0 \nabla_F T. \quad (10)$$

Однако само присутствие в (9) и (10) градиентов $\nabla_F u$, $\nabla_F T$ и $\nabla_F p$ по-прежнему требует определения внутренних полей потенциалов u , T и p , т. е. решения исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка.

В данной работе предлагается принять более радикальные упрощающие меры, а именно:

1) отказаться от поиска внутренних полей потенциалов переноса, заменив его поиском их значений, усредненных по объему и поверхности тела

$$u_V = V^{-1} \int_{(V)} u dV, \quad T_V = V^{-1} \int_{(V)} T dV, \quad p_V = V^{-1} \int_{(V)} p dV, \quad (11)$$

$$u_F = F^{-1} \int_{(F)} u dF, \quad T_F = F^{-1} \int_{(F)} T dF, \quad p_F = F^{-1} \int_{(F)} p dF; \quad (12)$$

2) градиенты потенциалов на поверхности тела представить приближенно в виде

$$\tilde{\nabla}_F u = (u_F - u_V) / \xi_D, \quad \tilde{\nabla}_F T = (T_F - T_V) / \xi_T, \quad \tilde{\nabla}_F p = (p_F - p_V) / \xi_p \quad (13)$$

и на основании (11) - (13) вместо выражений (9) и (10) записать

$$j_k^0 = -\omega_{V0} \left[\beta_k^0 (u_F - u_V) + \beta_{Tk}^0 (T_F - T_V) + \beta_{pk}^0 (p_F - p_V) \right], \quad (14)$$

$$q^0 = \sum_{k=1}^2 j_k^0 h_k(T_F) - \alpha^0 (T_F - T_V), \quad (15)$$

где

$$\beta_k^0 = D_k^0 / \xi_D, \quad \beta_{Tk}^0 = D_{Tk}^0 / \xi_T, \quad \beta_{pk}^0 = D_{pk}^0 / \xi_p, \quad (16)$$

$$\alpha^0 = \lambda^0 / \xi_T = \rho^0 c^0 a^0 / \xi_T. \quad (17)$$

Формулы (16) и (17) определяют коэффициенты внутренней влаго- и теплоотдачи, а величины ξ_D , ξ_T и ξ_p имеют физический смысл "эффективного" пути переноса субстанции (влаги и теплоты) под действием соответствующей движущей силы в виде разности потенциалов.

Показано, что величины ξ_D , ξ_T и ξ_p могут быть найдены на основе теории "регулярного режима" (Г.М. Кондратьев, А.В. Лыков), причем

$$\xi_p = \xi_D = \xi_T = \xi. \quad (18)$$

Для тел простой геометрической формы (прямоугольный параллелепипед, куб, брус неограниченной длины, неограниченная пластина, цилиндр круглого сечения ограниченной и неограниченной длины, шар) с использованием известных решений теории теплопроводности (А.В. Лыков, Г. Карслоу и Д. Егер) получены формулы для расчета ξ .

В этой же главе составлены дифференциальные уравнения текущих балансов массы влаги и теплоты

$$du_V/d\tau = \sum_{k=1}^2 du_{V_k}/d\tau = -fj^0; \quad (19)$$

$$c^* dT_V/d\tau + \sum_{k=1}^2 h_k(T_V) du_{V_k}/d\tau = -fq^0, \quad (20)$$

а также текущего паросодержания тела

$$du_{V2}/d\tau = f \left[r^{-1}(T_F - T_V) \left(\alpha^0 - \sum_{k=1}^2 j_k^0 c_k \right) - j_2^0 \right] - r^{-1} c^* dT_V/d\tau \quad (21)$$

и внутреннего давления

$$p_V^{-1} dp_V/d\tau = u_{V2}^{-1} du_{V2}/d\tau + T_V^{-1} dT_V/d\tau, \quad (22)$$

где

$$c^* = \sum_{k=0}^2 c_k u_{V_k}.$$

Уравнения (19) - (22) содержат только обыкновенные первые производные среднеобъемных потенциалов, что существенно облегчает их интегрирование. При заданных параметрах состояния среды, а также начальных и граничных условиях, эти уравнения в совокупности с выражениями для внутренних и внешних потоков образуют замкнутую систему, разрешимую относительно функций изменения во времени среднеобъемных и среднеповерхностных потенциалов в любом нестационарном процессе.

В третьей главе рассмотрена кинетика процесса сушки перегретым паром при изобарных условиях в предположении идеального перемешивания пара в объеме сушильной камеры.

Составлены уравнения текущих балансов массы влаги

$$G_n - G_c = dM_n/d\tau + dM_c/d\tau \quad (23)$$

и теплоты

$$g_n c_2 (T_n - T_c) =$$

$$= c^* dT_i / d\tau + \gamma c_2 dT_c / d\tau - [r_S + c_1(T_S - T_i) + c_2(T_c - T_S)] du_V / d\tau, \quad (24)$$

$$f\alpha^*(T_c - T_F) =$$

$$= c^* dT_i / d\tau - [r_S + c_1(T_S - T_V) + c_2(T_F - T_S)] du_V / d\tau, \quad (25)$$

где

$$g_n = G_n / M_0, \quad \gamma_n = M_c / M_0.$$

При заданных параметрах подводимого пара и начальных условиях уравнения (23) - (25) в совокупности с уравнениями для потоков, полученными в первых двух главах, образуют замкнутую систему, описывающую кинетику сушки перегретым паром. Весь процесс хронологически разделен на периоды "поверхностного" и "внутреннего" испарения.

Решение исходной системы уравнений для периода поверхностного испарения таково:

при $t_n = \text{var}$

$$t_V(\theta) = t_S + (t_{V_n} - t_S) \exp(-K_\lambda \theta); \quad (26)$$

$$t_c(\theta) = b [t_S K_g^{-1} + t_n(\theta) K_\alpha^{-1}]; \quad (27)$$

$$u_V(\theta) = u_{V_n} - K_r^{-1} (t_{V_n} - t_S) [1 - \exp(-K_\lambda \theta)] + b K_r^{-1} \left[t_S \theta - \int_0^\theta t_n(\theta) d\theta \right]; \quad (28)$$

при $t_n = \text{const}$

$$t_c = b (t_S K_g^{-1} + t_n K_\alpha^{-1}), \quad (29)$$

$$u_V(\theta) = u_{V_n} - b K_r^{-1} (t_n - t_S) \theta - K_r^{-1} (t_{V_n} - t_S) [1 - \exp(-K_\lambda \theta)], \quad (30)$$

где

$$t_V = T_V / T_i, \quad t_F = T_F / T_i, \quad t_n = T_n / T_i;$$

$$\theta = K\tau, \quad b = K_g K_\alpha / (K_g + K_\alpha);$$

$$K = f\omega_{V0} k^\circ, \quad K_g = g_n c_2 / (c_n K), \quad K_\alpha = f\alpha^* / (c_n K);$$

$$K_\lambda = f\alpha^\circ / (c_n K), \quad K_r = r_S / (c_n T_i).$$

Полученное решение учитывает все особенности начальной стадии этого периода, обусловленные прогревом материала и его увлажнением за счет конденсации пара среды.

Решение для периода внутреннего испарения:

при $t_n = \text{var}$

$$u_V(\theta') = u_{pS}^* + (s_1 - s_2)^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} A_i \exp(s_i \theta') - b_i^* b^* \cdot \int_0^{\theta'} \Delta t_n(\psi) \cdot \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} \exp[s_i(\theta' - \psi)] d\psi \right\}, \quad (31)$$

$$t_V(\theta') = t_S + (s_1 - s_2)^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} B_i \exp(s_i \theta') + b^* \cdot \int_0^{\theta'} \Delta t_n(\psi) \cdot \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} (s_i + 1) \exp[s_i(\theta' - \psi)] k d\psi \right\}, \quad (32)$$

$$t_c(\theta') = (K_g^* + K_r^*)^{-1} [K_g^* t_n(\theta') + K_r^* t_V(\theta')], \quad (33)$$

где

$$\begin{aligned} \theta' &= K\tau' = K(\tau - \tau_1), \\ A_i &= (s_i + a^*) (u_V^* - u_{pS}^*) - b_i^* (t_V^* - t_S), \\ B_i &= (s_i + 1) (t_V^* - t_S) - K_r^* (u_V^* - u_{pS}^*), \\ s_{1,2} &= -\frac{1}{2} \left[a^* + 1 \pm \sqrt{(a^* + 1)^2 - 4b^*} \right], \\ \Delta t_n(\theta) &= t_n(\theta) - t_S; \end{aligned}$$

при $t_n = \text{const}$

$$u_V(\theta) = u_{pS}^* - b_i^* \Delta t_n + (s_1 - s_2)^{-1} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} C_i \exp[s_i(\theta - \theta_1)], \quad (34)$$

$$t_V(\theta) = t_S + \Delta t_n + (s_1 - s_2)^{-1} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} D_i \exp[s_i(\theta - \theta_1)], \quad (35)$$

$$t_c(\theta) = (K_g^* + K_r^*)^{-1} [K_g^* t_n + K_r^* t_V(\theta)], \quad (36)$$

где

$$\begin{aligned} C_i &= (s_i + a^*) (u_V^* - u_{pS}^*) - b_i^* (t_V^* - t_S + b^* \Delta t_n s_i^{-1}), \\ D_i &= (s_i + 1) (t_V^* - t_S + b^* \Delta t_n s_i^{-1}) - K_r^* (u_V^* - u_{pS}^*). \end{aligned}$$

В этом решении температурная зависимость равновесного гигроскопического влагосодержания материала аппроксимируется линейным выражением в интервале t от t_S до t_n

$$u_p^* = u_{pS}^* - b_i^* (t_V - t_S). \quad (37)$$

Влияние параметров t_n и K_g на кинетику процесса показано на рис. 1.

В этой же главе дан пример расчета кинетики сушки перегретым паром резаной столовой свеклы в сопоставлении с экспериментальными данными А.Н. Острикова (рис. 2). Предложенная модель кинетики процесса может быть использована не только для проведения прогнозирующих расчетов при наличии необходимой информации о физических свойствах материала, но и для решения обратной задачи - определения этих свойств на основе экспериментальных кривых сушки того или иного конкретного материала.

Рассмотрена задача оптимального управления процессом сушки перегретым паром при наложенном ограничении на температуру материала. Показано, что наименьшая продолжительность процесса достигается при условии

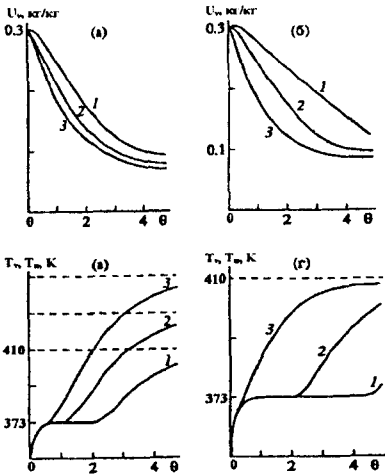


Рис. 1. Зависимость влагосодержания U_n (а), (б) и температуры (в), (г) от θ при $K_r=2.73$, $K_\lambda=K_\sigma=5$, $U_{ps}^*=0.1$, $b_1^*=0.146$; (а), (в) – $K_g=2$, $T_n=410$ К (1), 429 К (2), 448 К (3); (б), (г) – $T_n=410$ К, $K_g=1$ (1), 2 (2), 10 (3). Пунктирная линия – $T_n(\theta)$

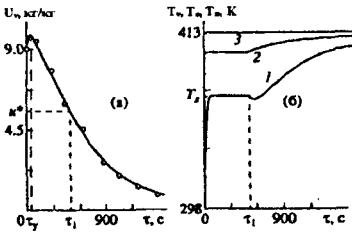


Рис. 2. Зависимость влагосодержания U_n (а) и температуры (б) (T_n (1), T_c (2), T_n (3)) от τ для процесса сушки паром резанной столовой свеклы во взвешенном слое. Линии – результаты расчетов, точки – экспериментальные данные.

кость или интенсивного орошения жидкостью.

При гидротермической обработке внешнее диффузионное сопротивление влагопереносу отсутствует, поэтому отсутствует и аналог выражению, определяющему плотность внешнего потока влаги. Однако появляется компенсирующая информация в виде равенства

$$u_F = u_p(p_c, T_F),$$

$$T = T_d,$$

которое обеспечивается:

1) предварительным подогревом материала до температуры

$$T_{Vn} = T_d; \quad (38)$$

2) выбором давления пара в камере сушки по условию

$$p_c \leq p_s(T_d); \quad (39)$$

3) управлением в ходе процесса температурой или (и) расходом подводимого пара в соответствии с функциональной зависимостью

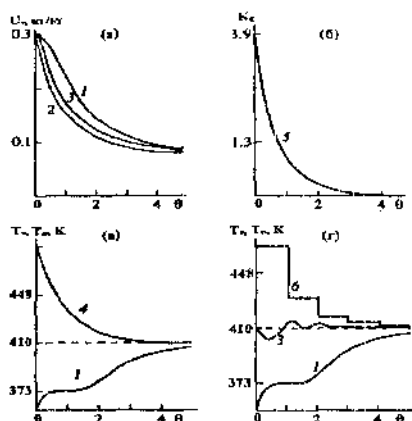
$$t_n(\theta) = t_d + K_r \left[K_\tau^{-1} + K_g^{-1}(\theta) \right] \times \\ \times (u_{Vn} - u_{pS}^* + b_1^* \Delta t_d) \exp(-\theta). \quad (40)$$

Уравнение (40) связывает между собой оба управляемых параметра $t_n(\theta)$ и $K_g(\theta)$, удовлетворяющих условию оптимальности процесса. Рис. 3 иллюстрирует кинетику процесса при различных режимах теплоподвода: видно, что при оптимальном и ступенчатом режимах сушка протекает существенно быстрее, чем при постоянной температуре подводимого пара. Продолжительность сушки определяется формулой

$$\tau_k = K^{-1} \ln \left(\frac{u_{Vn} - u_{pS}^* + b_1^* \Delta t_d}{u_{Vn} - u_{pS}^* + b_1^* \Delta t_d} \right). \quad (41)$$

В четвертой главе решена задача кинетики гидротермической обработки материалов. Под гидротермической обработкой капиллярнопористых коллоидных материалов подразумевают технологический процесс целенаправленного изменения их свойств путем погружения в жид-

Рис.3 Зависимость влагосодержания U_V (а), K_g (б), T_V (в), (г) от θ при $K_r=2.73$, $K_\lambda=K_\alpha=5$, $U'_{pc}=0.1$, $b'_r=0.146$. Кривая 1 — при $T_{v0}=354.5$ К, $T_n=410$ К, $K_g=3$; 2 — при предварительном подогреве материала до $T_n=410$ К согласно кривой 4 при $K_g=3$ или при изменении K_g согласно кривой 5 при $T_n=415$ К; 3 — при ступенчатом изменении T_n согласно кривой 6 при $K_g=3$.



согласно которому влагосодержание на поверхности тела совпадает с равновесным гидроскопическим при температуре этой поверхности T_F . Исходная система уравнений, описывающая кинетику влаго- и теплообмена капиллярнопористого коллоидного тела с жидкой средой при отсутствии бароградIENTного переноса, имеет вид

$$du_V/dt = f\omega_{V0}\beta_1^2[u_F - u_V + \delta_1(T_F - T_V)]; \quad (42)$$

$$c \cdot dT_V/dt - c_1(T_F - T_V)du_V/dt = f\alpha^0(T_F - T_V); \quad (43)$$

$$\alpha_1^*(T_c - T_F) = \alpha^0(T_F - T_V); \quad (44)$$

$$u_F = u'_{pc} - B'_1(T_F - T_c). \quad (45)$$

При заданной $T_c = \text{const}$ и начальных условиях

$$u_V(0) = u_{Vn}, \quad T_V(0) = T_{Vn}$$

эта система имеет решение:

$$u_V(\theta) = u'_{pc} + (s_1 - s_2)^{-1} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} A_i \exp(s_i \theta); \quad (46)$$

$$t_V(\theta) = t_c + (s_1 - s_2)^{-1} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} B_i \exp(s_i \theta); \quad (47)$$

$$t_F(\theta) = t_c + K_r/K_\alpha (s_1 - s_2)^{-1} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} B_i \exp(s_i \theta); \quad (48)$$

$$u_F(\theta) = u'_{pc} - b'_r K_r/K_\alpha (s_1 - s_2)^{-1} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} B_i \exp(s_i \theta), \quad (49)$$

где

$$A_i = (u_{Vn} - u'_{pc})(s_i + K_r + AK_r) - A(t_{Vn} - t_c);$$

$$B_i = (t_{Vn} - t_c)(s_i + 1) - K_r(u_{Vn} - u'_{pc});$$

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2} \left[1 + K_r + AK_r \pm \sqrt{(1 + K_r + AK_r)^2 - 4K_r} \right].$$

$$A = K_T (b_i' / K_\alpha + K_\delta / K_\lambda), \quad K_T = K_\alpha K_\lambda / (K_\alpha + K_\lambda), \quad K_i = (c_1 / c^*) (T_F - T_i) / T_i, \\ K_\delta = \delta_1 T_i, \quad K_\lambda = f \alpha^* / (c^* K_1), \quad K_\alpha = f \alpha_1^* / (c^* K_1), \quad \theta = K_1 \tau, \quad K_1 = f \omega_{V0} B_1^0.$$

Использованию уравнений (46) - (49) для проведения прогнозирующих расчетов кинетики того или иного конкретного процесса препятствует отсутствие данных о равновесном гидроскопическом влагосодержании и коэффициентах концентрационной и термоградиентной диффузии жидкой влаги для многих материалов.

В данной работе предложена методика экспериментального исследования указанных характеристик.

В качестве объекта исследования взяты сардельки I-го сорта (ГОСТ 23670-79) в натуральной (кишечной) оболочке, не прошедшие тепловую обработку.

Для опыта подбирались образцы равной массы ($M_n = 0.125$ кг) и одинаковых размеров ($d_0 = 0.0365$ и $l_0 = 0.116$ м). Набор образцов в количестве $n = 9$ штук, подвешенных на капроновые нити, погружали в ультратермостат *UTU-2.84*, заполненный водой, имеющей заданную температуру. В центр одного из образцов вводили игольчатый зонд с платиновым термометром сопротивления ТСП-955М, подключенный к лагометру Щ-4541/1 соответствующей градуировки. В ходе опыта следили за изменением температуры в центре образца и изменением массы образцов. Для этого через определенные промежутки времени поочередно по одному образцы извлекали из термостата и взвешивали на лабораторных электрических весах ВЛ Э134. После взвешивания данный образец в термостат не возвращали. Образец с датчиком температуры извлекали последним после того, как массы образцов, остающихся в термостате, уже не изменялись. Последний образец измельчали и высушивали в сушильном шкафу *VS-10* до постоянной массы M_0 .

По измеренным величинам $M(0)$, $M(\tau_1)$, ..., $M(\tau_n)$ и M_0 рассчитывали текущее влагосодержание образцов

$$u_V^{(3)}(\tau_j) = M(\tau_j) / M_0 - 1.$$

Начальное влагосодержание определяли как

$$u_V^{(3)} = M(0) / M_0 - 1,$$

а величину

$$u_V^{(3)}(\tau_n) = M(\tau_n) / M_0 - 1$$

принимали в качестве равновесного гидроскопического влагосодержания при данной температуре в термостате, т. е.

$$u_p'(T_c) = u_V^{(3)}(\tau_n).$$

Описанные опыты проводили при различных температурах воды в термостате в интервале T_c от 273.15 до 373.15 К. В результате получили зависимость $u_p'(T)$ (рис. 4), которую аппроксимировали полиномом четвертой степени

$$u_p'(t) = -183.06 + 616.613t - 754.411t^2 + 405.673t^3 - 81.195t^4.$$

Экспериментальные значения $u_n^{(3)}(\tau_j)$ и $T_n^{(3)}(\tau_j)$, полученные при $T_c = 353.15$ К, показаны на рис. 5 точками.

Эту информацию использовали для определения коэффициентов концентрационной и термоградиентной диффузии жидкой влаги в образцах D_1^0 и D_{T1}^0 , применяя следующую методику обработки данных.

По экспериментальным точкам $T_n^{(3)}(\tau_j)$ строили график зависимости

$$\ln \left[\frac{T_c - T_n^{(3)}(\tau_j)}{T_c - T_{Vn}} \right] \text{ от } \tau_j.$$

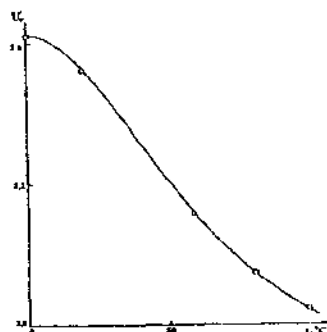


Рис. 4. Зависимость равновесного влаго содержания фарша сарделек I сорта от температуры: точки - экспериментальные значения; линия - аппроксимирующая зависимость

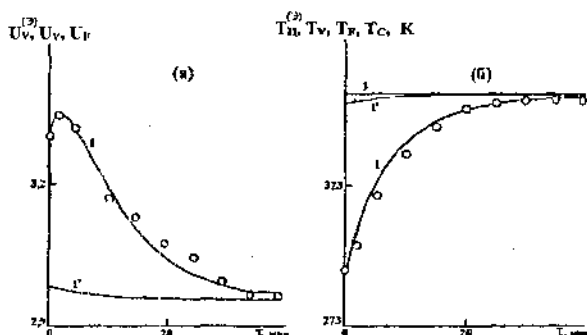


Рис. 5. Кинетика гидротермической обработки сарделек I сорта при $T_c = 353,15$ К: точки - экспериментальные значения $U_v^{(3)}(\tau_j)$ (а) и $T_n^{(3)}(\tau_j)$ (б); кривые 1, 1' - расчетные значения $U_v(\tau)$, $U_F(\tau)$ (а), $T_v(\tau)$, $T_F(\tau)$ (б), 3 - T_c

Как видно из рис. 6, почти все точки (за исключением нескольких начальных) хорошо ложатся на прямую линию, что свидетельствует о наличии стадии регулярного режима прогрева образца, которая характеризуется определенным значением темпа прогрева m . Значение m легко находится из графика по углу наклона прямой к оси абсцисс.

В стадии регулярного режима в уравнении (47) одна из экспонент ($i = 1$) становится пренебрежимо малой и поэтому

$$s_2 = -m/K_1. \quad (50)$$

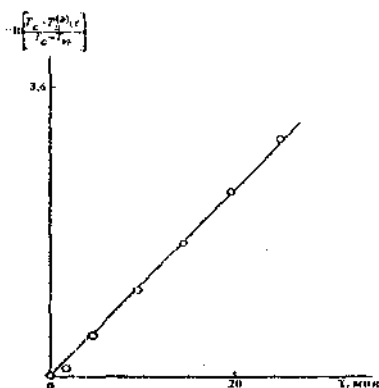


Рис. 6. К определению темпа нагревания исследуемого образца

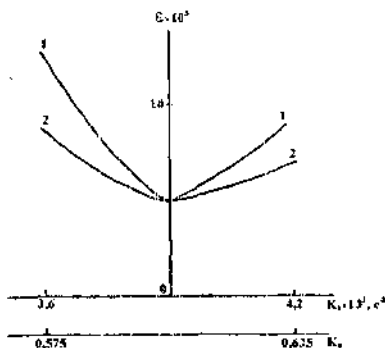


Рис. 7. Характер зависимости $\epsilon(K_1, K_T)$ в окрестности ϵ_{min} : кривая 1 - $\epsilon(K_1)$ при $K_T = 0,605$; 2 - $\epsilon(K_T)$ при $K_1 = 3,9 \cdot 10^{-3} c^{-1}$

Далее задача сводится к поиску неизвестных параметров K_1 и K_T , соответствующих минимуму интегральной невязки между экспериментальными и расчетными значениями функции $u_V(\tau)$

$$\epsilon(K_1, K_T) = \frac{1}{(n+1)\mu_{Vn}} \sum_{j=0}^n |u_V^{(j)}(\tau_j) - u_V(\tau_j)|. \quad (51)$$

Для вычисления $u_V(\tau)$ по формуле (46) необходимо располагать значениями s_1, s_2, A и K_T . Эти параметры выражаются через величины m, K_1 и K_T

$$K_T = \frac{K_1(t_c - t_{\nu n})}{K_\lambda(u_{\nu n} + c_0/c_1)}, \quad s_1 = -K_1 K_T / m, \quad A = \frac{(m - K_1)(m - K_1 K_T)}{m K_1 K_T}.$$

Методом градиентного спуска найдены значения K_1 и K_T , соответствующие минимуму невязки (51) (рис. 7). По этим данным рассчитаны все остальные параметры, характеризующие данный процесс: $K_\lambda = 0,642$; $K_1 = 0,051$; $A = 2,428$; $s_1 = -1,242$; $s_2 = -0,487$; $k_T = 75$ Вт/(м²·К); $\alpha_1^* = 1313$ Вт/(м²·К); $\beta_1^* = 3,077 \cdot 10^{-5}$ м/с;

$T_{\nu n} = 349,7$ К; $b_1^* = 1,755$; $D_1^* = 2,15 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $D_{T1}^* = 2,027 \cdot 10^{-9}$ м²/(с·К); $\delta_1 = 9,43 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Как видно из рис. 5, расчетная кривая $u_V(\tau)$ вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями $u_V^{(j)}(\tau_j)$, описывая как начальную стадию набухания, так и последующую стадию отбухания.

Далее приведен анализ влияния различных факторов на кинетику процесса. Из рис. 8 видно, что увеличение коэффициента концентрационной диффузии влаги D_1^* почти не сказывается на скорости теплообмена, но существенно ускоряет влагообмен.

Увеличение коэффициента термоградиентной диффузии влаги D_{T1}^0 также слабо влияет на скорость теплообмена, но существенно замедляет процесс влагообмена (рис. 9).

Гидроскопические характеристики материала u'_{pc} и b'_i почти не влияют на скорость теплообмена, но существенно влияют на кинетику влагообмена: с увеличением u'_{pc} процесс замедляется (рис. 10), а при уменьшении b'_i (при постоянном значении u'_{pc}) процесс ускоряется (рис. 11).

В этой же главе описан способ интенсификации гидротермической обработки материалов орошением пароводяной смесью. На рис. 12 показана известная промышленная установка, применяемая для ошпарки свиных туш. Недостатком указанной установки является низкая температура воды, подаваемой на орошение. В этой установке явление кавитации в насосе не позволяет нагреть циркулирующую воду выше 90 °С. Подвод "недогретой" воды не только снижает интенсивность тепловой обработки, но и требует повышенного расхода энергии на распыливание, так как с понижением температуры увеличивается поверхностное натяжение и вязкость воды.

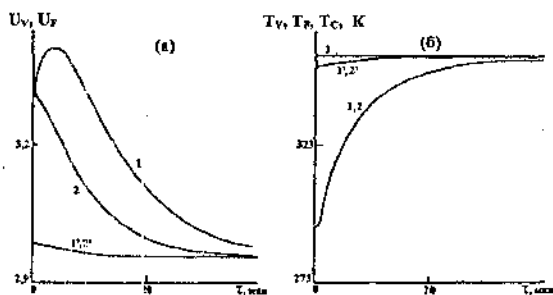


Рис. 8. Влияние D_{T1}^0 на кинетику процесса: 1, 1' - $U_V(t)$, $U_F(t)$ (а) и $T_V(t)$, $T_F(t)$ (б) при $D_{T1}^0 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 2, 2' - то же при $D_{T1}^0 = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 - T_C .

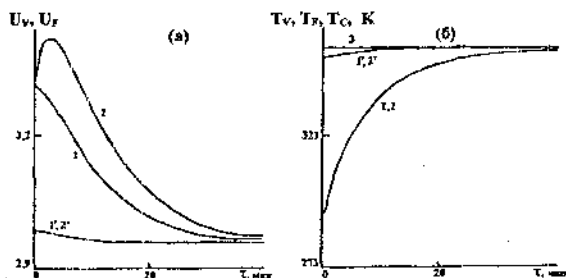


Рис. 9. Влияние D_{T1}^0 на кинетику процесса: 1, 1' - $U_V(t)$, $U_F(t)$ (а) и $T_V(t)$, $T_F(t)$ (б) при $D_{T1}^0 = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{К})$; 2, 2' - то же при $D_{T1}^0 = 2,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{К})$; 3 - T_C .

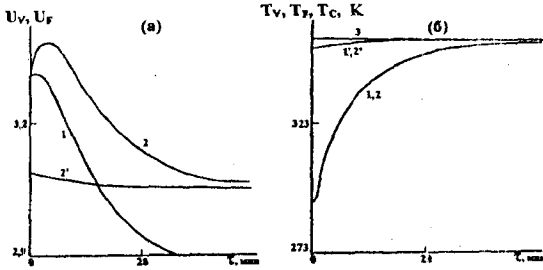


Рис. 10. Влияние U'_{pc} на кинетику процесса: 1, 1' - $U_v(t)$, $U_f(t)$ (а) и $T_v(t)$, $T_f(t)$ (б) при $U'_{pc} = 2,857$; 2, 2' - то же при $U'_{pc} = 3,057$; 3 - T_c

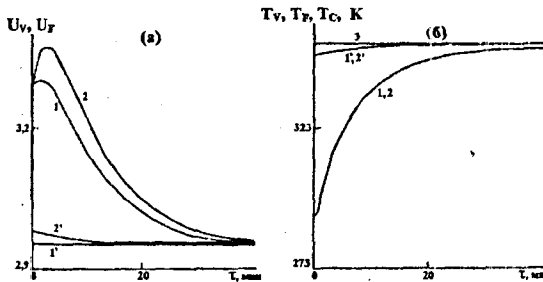


Рис. 11. Влияние β' на кинетику процесса: 1, 1' - $U_v(t)$, $U_f(t)$ (а) и $T_v(t)$, $T_f(t)$ (б) при $\beta' = 0$; 2, 2' - то же при $\beta' = 10$; 3 - T_c .

Для устранения этих недостатков предлагается теплообменник и фильтр тонкой очистки установить на нагнетательной стороне циркуляционного насоса (рис. 13), причем теплообменник эффективнее выполнить в виде струйного аппарата. За счет этого создается возможность подвода к форсункам перегретой воды и сохраняется бескавитационный режим работы насоса. Например, при давлении циркулирующей воды в теплообменнике, равном 0.3 МПа, вода может быть нагрета до 133 °С. При распыливании такой воды в камере с давлением 0.1 МПа образуется теплонесущая пароводяная смесь с тонкодисперсной жидкой фазой и температурой 100 °С, причем температура водяной пленки на поверхности обрабатываемого материала поддерживается постоянной вследствие конденсации пара. За счет повышения температуры воды от 90 до 133 °С ее вязкость снижается в 1.5 раза, уменьшается и поверхностное натяжение, в результате чего сокращаются энергозатраты на привод насоса.

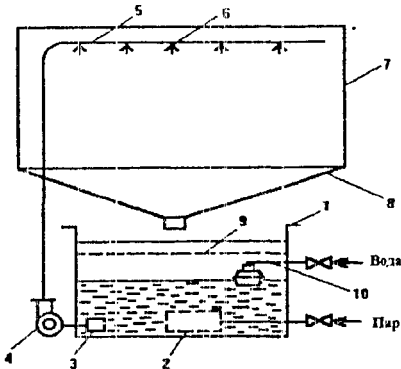


Рис. 12. Схема известной установки: 1 - сборник; 2 - барботер; 3 - фильтр тонкой очистки; 4 - насос; 5 - оросительные трубы; 6 - форсунки; 7 - камера; 8 - поддон; 9 - сетчатый фильтр; 10 - устройство подачи воды.

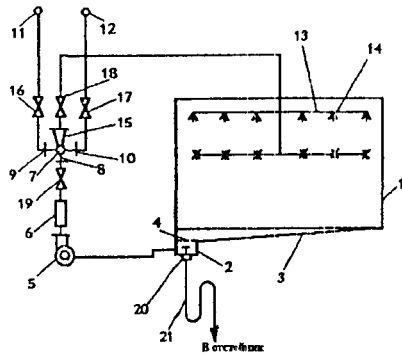


Рис. 13. Схема предлагаемой установки: 1 - камера; 2 - сборник; 3 - поддон; 4 - фильтр грубой очистки; 5 - насос; 6 - фильтр тонкой очистки; 7 - струйный аппарат; 8, 9, 10 - патрубки; 11, 12 - устройство подачи теплоносителя; 13 - оросительные трубы; 14 - форсунки; 15 - диффузор; 16, 17, 18, 19 и 20 - вентиля; 21 - гидрозатвор.

Основные результаты, полученные в данной работе

1. Решена задача внешнего конвективного влаго- и теплообмена капиллярнопористого коллоидного тела с однофазной газопаровой средой с учетом нормальной составляющей скорости потока среды на поверхности тела.

2. Предложены уравнения для расчета влагосодержания газопаровой среды в состоянии насыщения, температуры "мокрого" термометра и постоянной скорости поверхностного испарения.

3. Составлено приближенное математическое описание внутреннего влаго- и теплопереноса, основанное на представлении движущих сил разностями между среднесurfaceвыми и среднеобъемными потенциалами и определении коэффициентов переноса методами теории регулярного режима.

4. Решена задача кинетики сушки перегретым паром и оптимального управления процессом при высушивании термочувствительных материалов.

5. Решена задача кинетики гидротермической обработки материалов.

6. Предложен метод экспериментального исследования гидроскопических и диффузионных свойств капиллярнопористых материалов.

7. Предложен способ интенсификации процесса гидротермической обработки путем орошения материала пароводяной теплоносительной смесью.

Обозначения

a, a° - коэффициенты температуропроводности соответственно среды и тела, $\text{м}^2/\text{с}$; b'_t, b''_t - коэффициенты температурной зависимости равновесного гидро- и гигроскопического влагосодержания материала; c, c°, c_k - изобарные теплоемкости среды, тела и k -й фазы, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; c^* - приведенная теплоемкость тела, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; D - коэффициент диффузии пара в среде, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_k^\circ, D_{Tk}^\circ, D_{pk}^\circ$ - коэффициенты концентрационной, термоградиентной и бароградиентной диффузии k -й фазы влаги, $\text{м}^2/\text{с}$, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{К})$, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Па})$; F - площадь поверхности тела, м^2 ; f - удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$; $G_{\text{п}}, G_{\text{с}}$ - расходы подводимого и отводимого пара в сушильной камере, $\text{кг}/\text{с}$; $H, H_{\text{с}}$ - полные энтальпии тела и среды, Дж ; h_k - удельная энтальпия k -го компонента (фазы), $\text{Дж}/\text{кг}$; k, k^* - "условный" и "исправленный" коэффициенты внешней массоотдачи, приведенные к движущей силе в виде разности паросодержаний среды в ее объеме и на поверхности тела, $\text{м}/\text{с}$; M, M_k - общая масса тела и масса k -й фазы, кг ; m - темп прогресса, с^{-1} ; N - постоянная скорость сушки, с^{-1} ; p, p_F, p_V - локальное (зависящее от координат) давление и его значения, усредненные по поверхности и объему тела, Па ; $p_{\text{с}}, p_k$ - общее давление среды и парциальное давление k -го компонента, Па ; $p_{\text{с}}, p_t$ - давление насыщенного пара и давление, соответствующее "тройной" точке, Па ; R - универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$; r - удельная теплота испарения влаги, $\text{Дж}/\text{кг}$; $T_{\text{с}}$ - температура в объеме среды, К ; T, T_V, T_F - локальная температура и ее значения, усредненные по объему и поверхности тела, К ; $T_t, T_{\text{м}}$ - температура "тройной" точки и температура "мокрого" термометра, К ; $T_{V_{\text{н}}}, T_{V_{\text{к}}}, T_{\text{д}}$ - соответственно начальное, конечное и максимально допустимое значения температуры, К ; $T_{\text{п}}, T'_{\text{с}}$ - температура подводимого пара и насыщенного пара при данном давлении в камере, К ; u, u_V, u_F - локальное влагосодержание и его значения, усредненные по объему и поверхности тела, кг влаги / кг сухого вещества; $u_{V_{\text{н}}}$ - начальное влагосодержание, кг влаги / кг сухого вещества; V, V_k - общий объем тела и объем k -й фазы, м^3 ; $x, x_{\text{с}}, x_F$ - локальное паросодержание и его значения в объеме среды и на поверхности тела, кг пара / кг сухого газа; $x_{\text{с}}, x_{\text{м}}$ - значения x в состоянии насыщения и при $T = T_{\text{м}}$, кг пара / кг сухого газа; $\lambda^\circ, \lambda, \lambda_k$ - коэффициенты теплопроводности тела, среды и k -го компонента (фазы), $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; μ_k - молярная масса k -го компонента, $\text{кг}/\text{кмоль}$; ν - коэффициент кинематической вязкости среды, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ, ρ°, ρ_k - плотность среды, тела и k -го компонента (фазы), $\text{кг}/\text{м}^3$; ω_{V_0} - объемная массовая концентрация твердой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$. Индексы $k = 0, 1, 2, 3$ соответствуют каркасу тела, жидкости, пару и смеси неконденсирующихся газов (воздуху).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Кинетика сушки паром / В.М. Харин, В.И. Кулаков, О.А. Семенихин, Н.А. Балашов // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31. № 4. С. 399-408.

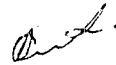
2. Харин В.М., Семенихин О.А., Балашов Н.А. Интенсификация теплообмена при гидротермической обработке материалов способом орошения // Теплоэнергетика: Межвуз. сб. науч. тр.- Воронеж: ВГТУ, 1997. С. 124-127.

3. Харин В.М., Семенихин О.А. Внутренний влаго- и теплоперенос в капиллярнопористых коллоидных телах // Теплоэнергетика: Межвуз. сб. науч. тр.- Воронеж: ВГТУ, 1998. С. 190-197.

4. Харин В.М., Шышацкий Ю.И., Семенихин О.А. Внешний влаго- и теплообмен капиллярнопористого коллоидного тела с газопаровой средой // Теплоэнергетика: Межвуз. сб. науч. тр.- Воронеж: ВГТУ, 1998. С. 15-22.

5. Харин В.М., Семенихин О.А., Балашов Н.А. Установка для гидротермической обработки материалов. Материалы XXXV отч. науч. конф. за 1996 г. Воронеж: ВГТА, 1997. Ч. 1. С. 153.

6. Харин В.М., Балашов Н.А., Семенихин О.А. Кинетика сушки паром. Материалы XXXVI отч. науч. конф. за 1997 г. Воронеж: ВГТА, 1998. Ч. 2. С. 175.



ЛР № 070419 от 12.02.92. Подписано в печать 5.11.98.

Формат 60x34/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 85 экз. Зак. № 292

Издательство

Воронежского государственного технического университета

394025 Воронеж, Московский просп., 14