

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 532.5:66.047
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-40-49>

Поступила в редакцию 18.10.2022
Received 18.10.2022

П. В. Акулич¹, В. А. Седнин², М. И. Позднякова²¹

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

**ТЕПЛОМАССООБМЕН КАПЕЛЬ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ
ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ ДЕГИДРАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ
КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОГО ЭНЕРГОПОДВОДА**

Аннотация. Приведены результаты моделирования дегидратации капель концентрированной жидкости на примере керамики при конвективно-радиационном энергоподводе в условиях прямооточного и противоточного движения фаз, а также импульсных встречных потоков теплоносителя. Сформулирована модель дегидратации одиночной капли на основе уравнений теплопроводности с источником членом и диффузии влаги с учетом изменения ее размера вследствие испарения. При этом учитывается влияние конвективного потока пара с испаряющейся поверхности капли (поток Стефана), а также вдува испаряющегося пара в поток горячего газа на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга). Воздействие инфракрасного излучения описывается уравнением Бугера. Уравнение движения капли в газовом потоке учитывает силы, обусловленные гравитацией, разностью скоростей и плотностей фаз. В результате численного моделирования установлено, что при противоточном движении фаз интенсивность дегидратации выше, чем при прямооточном. Это обусловлено как повышением относительной скорости движения фаз, так и увеличением времени пребывания капли в интенсивной области инфракрасного излучения. Показано, что дальнейшая интенсификация испарения возможна за счет создания импульсных встречных потоков теплоносителя. Выполнено сравнение расчетных результатов с опытными данными, подтверждающее адекватность модели. Результаты исследования могут быть полезны при разработке новых теплотехнологий и аппаратов для дегидратации концентрированных растворов и суспензий.

Ключевые слова: тепломассообмен капли, распылительная сушка, радиационно-конвективная сушка

Для цитирования: Акулич, П. В. Тепломассообмен капель концентрированных растворов при распылительной дегидратации в условиях конвективно-радиационного энергоподвода / П. В. Акулич, В. А. Седнин, М. И. Позднякова // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 40–49. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-40-49>

Piotr V. Akulich¹, Vladimir A. Sednin², Marina I. Pozdnyakova²

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

**HEAT AND MASS TRANSFER OF DROPS OF CONCENTRATED SOLUTIONS DURING SPRAY
DEHYDRATION UNDER CONDITIONS OF CONVECTIVE-RADIATION ENERGY SUPPLY**

Abstract. The results of modeling the dehydration of drops of a concentrated liquid, on the example of ceramics, with convective-radiation energy supply under conditions of direct-flow and counter-current phase motion, as well as pulsed counter-flows of gas, are presented. A model for the dehydration of a single drop is formulated based on the equations of heat conduction with a source term and diffusion of moisture, taking into account the change in its size due to evaporation. This takes

into account the influence of the convective vapor flow from the evaporating droplet surface (Stefan flow), as well as the blowing of evaporating vapor into the hot gas flow on the heat transfer coefficient (Spalding correction). The impact of infrared radiation is described by the Bouguer equation. The equation of motion of a drop in a gas flow takes into account the forces due to gravity, the difference in velocities and phase densities. As a result of numerical simulation, it was found that with countercurrent phase movement, the intensity of dehydration is higher than with cocurrent flow. This is due to both an increase in the relative velocity of the phases and an increase in the residence time of the drop in the intense region of infrared radiation. It is shown that further intensification of evaporation is possible due to the creation of pulsed counter gas flows. The calculated results are compared with the experimental data, which confirms the adequacy of the model. The results of the study can be useful in the development of new heat technologies and devices for dehydration of concentrated solutions and suspensions.

Keywords: heat and mass transfer of a drop, spray drying, radiation-convective drying

For citation: Akulich, P. V., Sednin V. A., Pozdnyakova M. I. Heat and mass transfer of drops of concentrated solutions during spray dehydration under conditions of convective-radiation energy supply. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 40–49 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-40-49>

Введение. Процессы распылительной дегидратации (сушки) жидких материалов с разнообразными свойствами находят широкое распространение в различных отраслях промышленности. Они применяются при разработке перспективных технологий и получении новых материалов (композитных, микрогранулированных, быстрорастворимых, ультрадисперсных). Однако эти технологии характеризуются высокой энергоемкостью, поэтому проблемы повышения эффективности и снижения энергозатрат привлекают внимание многих исследователей.

Различные методы повышения эффективности всесторонне изучаются и совершенствуются. Так, разрабатываются и применяются современные двухстадийные технологии обезвоживания (выпаривания и сушки или распылительной сушки и досушивания материала в кипящем слое); исследуются предварительный подогрев и перегрев термостойких жидкостей; ведутся поиски активизации гидродинамического режима на основе струйных, закрученных и сильно нестационарных потоков теплоносителя, генерируемых камерами пульсационного горения; модернизируются системы диспергирования и ввода ретур (дисперсного материала в факел распыла); большое внимание уделяется технологическим аспектам.

В то же время развиваются исследования конвективно-радиационного подвода энергии. Например, в [1] приводятся результаты исследования конвективно-радиационного способа сушки распылением, в котором поток инфракрасного излучения (ИК-излучения) создается за счет нагрева стенок камеры или расположения нагревателя по оси цилиндрической камеры. В [2] предложено располагать ИК-излучатели на боковой поверхности между жалюзи, через которые подается дополнительный поток теплоносителя. Способ распылительной сушки с комбинированным энергоподводом предложен в патенте № 18467 Республики Беларусь на изобретение «Способ сушки жидких материалов» (автор – П. В. Акулич). Сущность данного способа состоит в конвективно-радиационном энерговоздействии на капли распыляемой жидкости, причем ИК-излучение фокусируется на область факела распыла [3].

Для поиска методов повышения эффективности процессов распылительной дегидратации и их оптимизации применяются различные подходы. Математическое моделирование часто основывается на механике сплошных сред, раздельном описании движения фаз с учетом межфазного теплообмена, на воспроизведении структуры потоков на основе идеализации их смешения. В большей степени изучались кинетика сушки капель при конвективном подводе теплоты, режимы движения фаз в распылительных камерах, свойства полученных материалов [4–7].

Несмотря на накопленный опыт, развиваются исследования формирования требуемой структуры и свойств твердой фазы в зависимости от условий термогидродинамических воздействий, например, при распылительной сублимационной сушке фармацевтических препаратов, суспензий ферритов, синтеза керамических порошков, где используются и анализируются различные способы подвода теплоты. Уделяется внимание изучению влияния комбинированных методов энергоподвода, в том числе конвективно-радиационного, а также сильно нестационарных термогидродинамических воздействий [8–12]. Развитие энергоэффективных технологий распылительной дегидратации концентрированных растворов обусловлено важностью получения разнообразных порошкообразных материалов с требуемыми свойствами и высокой их практической значимостью.

Цель работы – исследование методов интенсификации тепломассообмена капель при сушке распылением путем комбинированного энергетического воздействия конвекцией и ИК-излучением, а также импульсных режимов встречных потоков движения фаз и теплоносителя.

Математическая модель. Рассмотрим тепломассообмен капли концентрированного раствора или суспензии применительно к условиям распылительной дегидратации. Поскольку концентрация частиц в потоке распылительной камеры мала, можно пренебречь соударением и взаимодействием частиц, а также дроблением и их коагуляцией и ограничиться рассмотрением одиночной частицы. Испаряемая капля раствора (суспензии), на которую действуют силы тяжести, аэродинамического сопротивления потока теплоносителя, выталкивающая сила Архимеда, движется сверху вниз. Теплота к частице подводится конвекцией и ИК-излучением, которое направлено вертикально вниз. Будем учитывать диффузию влаги, теплопроводность вещества частицы и изменение размера капли, влияние конвективного потока пара с испаряющейся поверхности капли (поток Стефана), а также вдува испаряющегося пара в поток горячего газа на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга). Рассмотрим влияние различных режимов воздействия на частицу, в частности прямого и противоточного движения фаз, импульсных встречных потоков теплоносителя, в том числе в сочетании с инфракрасным облучением.

Моделирование данного процесса позволяет исследовать влияние отдельных параметров на кинетику и динамику тепломассообмена капель концентрированных растворов и оценить пути интенсификации и возможности использования в реальных аппаратах с комбинированным энергоподводом.

Уравнение переноса влаги внутри капли (частицы) имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \nabla \cdot (-D_{\text{эф}} \nabla C) = J - \mathbf{u} \nabla C, \quad (1)$$

где C – концентрация влаги в капле (частице), кг/м³; $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии влаги, м²/с; τ – время, с.

Уравнение переноса теплоты запишем следующим образом:

$$\rho_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (-\lambda_{\text{эф}} \nabla T) = I - \rho_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \mathbf{u} \nabla T, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ч}}$, $c_{\text{ч}}$ – соответственно плотность, кг/м³, и удельная теплоемкость капли (частицы), Дж/(кг·К); T – температура вещества капли, К; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность вещества капли, Вт/(м·К).

На поверхности частицы задача решается при граничных условиях III рода:

$$-\mathbf{n} \cdot (-D_{\text{эф}} \nabla C) = \beta (\rho_{\text{п.п}} - \rho_{\text{п.г}}) K_S, \quad (3)$$

$$-\mathbf{n} \cdot (-\lambda_{\text{эф}} \nabla T) = \alpha (T_{\text{пов}} - T_{\text{г}}) - r_{\text{п}} \beta (\rho_{\text{п.п}} - \rho_{\text{п.г}}) K_S, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{п.п}}$, $\rho_{\text{п.г}}$ – концентрация (плотность) паров на поверхности частицы в состоянии насыщения и в потоке газа соответственно, $\rho_{\text{п.п}} = \chi C_{\text{пов}}$, кг/м³; $T_{\text{г}}$ – температура газа, К; $r_{\text{п}}$ – удельная теплота парообразования, Дж/кг; χ – равновесное соотношение плотностей пара и жидкости на поверхности частицы; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); β – коэффициент массоотдачи, м/с.

Множитель $K_S = 1/(1 - \rho_{\text{п.п}}/\rho_{\text{г}})$ учитывает конвективный поток пара с испаряющейся поверхности капли (поток Стефана).

Коэффициент теплоотдачи определяется по корреляционной зависимости $Nu = [(\ln(1 + B))/B] \times (2 + 0,55Re^{0,5}Pr^{0,33})$, где B – теплообменное число Сполдинга, $B = c_{\text{рп}}(T_{\text{г}} - T_{\text{пов}})/r_{\text{п}}$. Значения физических параметров находятся по средней температуре в пограничном слое, приближенно равной $(T_{\text{г}} + T_{\text{пов}})/2$. Таким образом, учитывалось и анализировалось влияние вдува относительно холодного испаряющегося пара в поток газа на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга). Коэффициент массоотдачи рассчитывается по корреляции Фреслинга $Sh = 2 + 0,55Re^{0,5}Sc^{0,33}$.

Для скорости изменения диаметра капли запишем уравнение

$$\frac{d(d)}{d\tau} = -\frac{2D_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} d} Sh (\rho_{\text{п.п}} - \rho_{\text{п.г}}) K_S. \quad (5)$$

Уравнение движения капли в газовом потоке с учетом действующих сил, обусловленных гравитацией, разностью скоростей и плотностей фаз представим следующим образом:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})}{2\rho_{\text{ч}} + \rho_{\text{г}}}g + \frac{3}{2} \frac{\xi}{d} \frac{\rho_{\text{г}}}{2\rho_{\text{ч}} + \rho_{\text{г}}} |v - w|(v - w). \quad (6)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц рассчитаем по формуле Брауэра

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,4; \text{Re} = \frac{d|v - w|}{\nu}. \quad (7)$$

Распространение ИК-излучения в поглощающей двухфазной среде описывается на основе закона Бугера. Плотность теплового потока, подведенная к частице за счет ИК-излучения, приближенно определяется по выражению

$$q(z) = q_0 \exp(-kz), \quad (8)$$

где $q_0 = \varepsilon C'_0 (T_{\text{н}}/100)^4$; C'_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C'_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ε – степень черноты, $\varepsilon = 0,9$.

Для расчета коэффициента ослабления излучения использовалось выражение $k = 0,25Fc$ [13], где F – удельная свободная поверхность частиц, $\text{м}^2/\text{кг}$; c – массовая концентрация капель в объеме, $\text{кг}/\text{м}^3$. Следует отметить, что в этом случае рассматривается поглощательная способность среды, состоящей из абсолютно черных монодисперсных сферических частиц, в зависимости от удельной поверхности частиц, их концентрации и толщины поглощающего слоя. Допускается выполнение законов геометрической оптики. Поэтому в действительности эмпирический коэффициент в показателе экспоненты зависит от множества факторов и не всегда принимает значение 0,25.

Удельный тепловой поток, выделяемый в капле при проникновении ИК-излучения, определяется согласно выражению

$$I = (1 - a_{\text{отр}}) q(z) k_{\text{ч}} \exp[-k_{\text{ч}}(x - R)]. \quad (9)$$

Давление насыщенного водяного пара $p_{\text{н}}$ в диапазоне температур от 0 до 100 °С рассчитывается по приближенной формуле Антуана

$$p_{\text{н}} = 133,3 \cdot 10^{8,074 - \frac{1733}{T - 39,31}}. \quad (10)$$

Коэффициент диффузии водяных паров в воздухе составляет $D_{\text{п}} = D_0(p_0/p)(T/T_0)^{1,8}$, где $D_0 = 22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $p_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$.

Плотность газовой смеси и водяных паров определяется согласно уравнению состояния идеального газа $\rho_{\text{г}} = p_{\text{г}} M_{\text{г}} / (R^* T)$ и $\rho_{\text{п}} = p_{\text{п}} M_{\text{п}} / (R^* T)$.

Скорость движения вещества в частице по координате x вычислим по формуле

$$u_x = \frac{dR}{d\tau} \frac{x}{R_0} = u_{\text{г}} \frac{x}{R_0}, \quad u_{\text{г}} < 0. \quad (11)$$

Перемещение вещества в частице по оси x можно представить, как $dx = -bx$, где $b = (R_0 - R)/R_0$. Аналогично рассчитывается перемещение и по другим осям.

Текущая средняя плотность частицы определяется соотношением

$$\bar{\rho}_{\text{ч}} = \bar{C} + \frac{C_0 d_0^3}{U_0 d^3}, \quad (12)$$

где U_0 – начальное влагосодержание капли, $U_0 = W_0 / (1 - W_0)$, $\text{кг}/\text{кг}$. Средняя влажность капли равна $W = \bar{C} / \bar{\rho}_{\text{ч}}$.

Результаты моделирования и сравнение с опытными данными. Основные параметры, при которых выполнялись расчеты: исходный материал – керамическая суспензия; $d_0 = 350 \text{ мкм}$; $W_0 = 0,6 \text{ кг}/\text{кг}$; $\rho_{\text{р}} = \bar{\rho}_{\text{ч}0} = 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $p_{\text{н.г}} = 2 \text{ кПа}$; $T_{\text{с}} = 393 \text{ К}$; $R^* = 8,3142 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$;

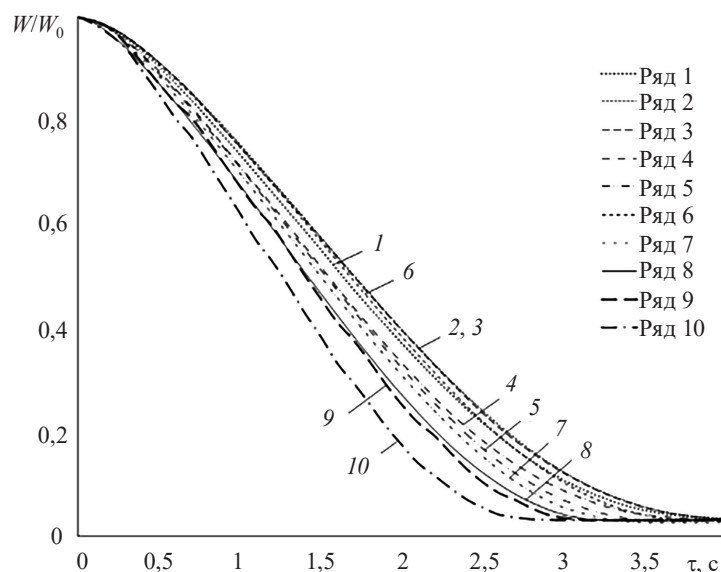


Рис. 1. Кинетические зависимости дегидратации капли концентрированной жидкости: 1 – $v = 2$ м/с, $T_{\text{н}} = 1073$ К; 2 – $v = 2$ м/с, $q_0 = 0$; 3, 6 – $v = 0,5$ м/с, $q_0 = 0$; 4, 5 – $v = 0,5$ м/с, $T_{\text{н}} = 1073$ К (кривые 1–4 при $D_{\text{эф}} = 10^{-8}$ м²/с); 7 – $v = 0$; 8 – $v = -1$ м/с; 9 – $v_1 = 2$ м/с, $v_2 = -3,5$ м/с; 10 – $v_1 = 5$ м/с, $v_2 = -6$ м/с (кривые 5–10 при $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-7}$ м²/с, кривые 7–10 при $T_{\text{н}} = 1073$ К) (номера кривых соответствуют номерам рядов)

Fig. 1. Kinetic dependences of dehydration of a concentrated liquid drop: 1 – $v = 2$ m/s, $T_e = 1073$ K; 2 – $v = 2$ m/s, $q_0 = 0$; 3, 6 – $v = 0.5$ m/s, $q_0 = 0$; 4, 5 – $v = 0.5$ m/s, $T_e = 1073$ K (curves 1–4 at $D_{\text{ef}} = 10^{-8}$ m²/s); 7 – $v = 0$; 8 – $v = -1$ m/s; 9 – $v_1 = 2$ m/s, $v_2 = -3.5$ m/s; 10 – $v_1 = 5$ m/s, $v_2 = -6$ m/s (curves 5–10 at $D_{\text{ef}} = 5 \cdot 10^{-7}$ m²/s, curves 7–10 at $T_e = 1073$ K) (curve numbers correspond to series numbers)

$M_{\text{п}} = 18,02$ кг/кмоль; $k = 0,43$; $k_{\text{ч}} = 3000$; $r_{\text{п}} = 2250$ кДж/кг; $c_{\text{ч}} = 3000$ Дж/(кг·К); $\mu_{\text{г}} = 21 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\lambda_{\text{эф}} = 2$ Вт/(м·К); $a_{\text{отр}} = 0,1$. Скорость потоков газа в импульсном режиме задавалась выражением $v = (1 - \delta)v_1 + \delta v_2$, где $\delta(\tau)$ – единичная ступенчатая функция времени.

В результате численного решения приведенной системы уравнений получены кинетические зависимости дегидратации капель при различных термогидродинамических режимах (рис. 1).

Вначале было выполнено исследование прямого движения газа и частицы. В этом случае скорости газа и частицы направлены вниз (кривые 1–6). При этом лучистый поток направлен спутно движению фаз. При плотности лучистого потока, соответствующей $T_{\text{н}} = 1073$ К, интенсивность дегидратации заметно выше при меньшей скорости газа $v = 0,5$ м/с (кривая 4), чем при $v = 2$ м/с (кривая 1). Это обусловлено следующим: при большей скорости газа частица быстрее смещается вниз – в область менее интенсивного лучистого потока. Только конвективный подвод теплоты приводит к меньшей интенсивности испарения капли (кривые 2 и 3). Причем интенсивность процесса несколько выше при меньшей скорости газа $v = 0,5$ м/с (кривая 3) по сравнению с $v = 2$ м/с (кривая 2), однако это отличие очень незначительно. Конечно, интенсивность массоотдачи зависит от сопротивления диффузии влаги. С ростом эффективного коэффициента диффузии влаги внутри частицы скорость дегидратации возрастает, причем наиболее значительно – при воздействии лучистого потока (кривые 5 и 6). Следует заметить, что при отсутствии скорости потока газа интенсивность выше, чем при наличии скорости спутного потока. Это вызвано тем, что движение частицы замедляется при отсутствии скорости потока газа, при этом время пребывания в зоне большей интенсивности лучистого потока увеличивается.

Из вышеизложенного следует, что для ускорения тепло- и массообменных процессов необходимо увеличивать время пребывания частиц в области высокой плотности излучения. Такого эффекта можно достигнуть за счет встречного движения потока газа. Как показали расчеты, при скорости газа $v = -1$ м/с, то есть при противоточном движении фаз, интенсивность дегидратации выше (кривая 8), чем при прямооточном. При противотоке выше и относительная скорость движения, что приводит к росту конвективной составляющей подвода теплоты. Однако дальнейшее увеличение скорости встречного потока газа вызывает обратное движение частицы вверх, что недопустимо.

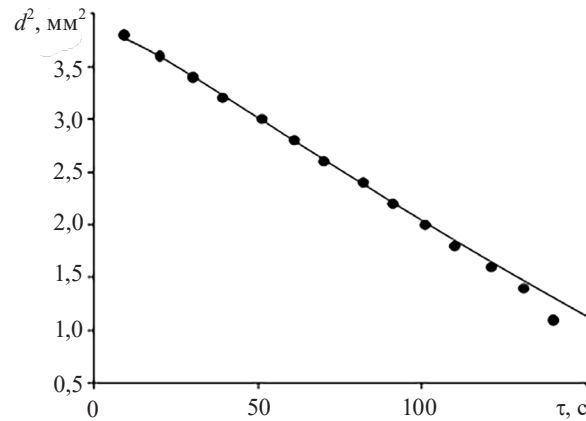


Рис. 2. Изменение квадрата диаметра капли воды от времени при $v = 0,5$ м/с и $t = 100$ °С
 Fig. 2. Change in the square of the diameter of a drop of water from time at $v = 0.5$ m/s and $t = 100$ °C

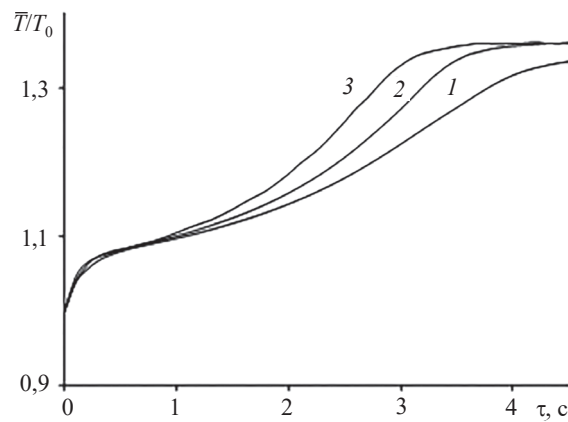


Рис. 3. Температурные зависимости капли (частицы) в процессе дегидратации:
 $1 - v = 2$ м/с, $D_{эф} = 10^{-8}$ м²/с; $2 - v = -1$ м/с, $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $3 - v_1 = 5$ м/с, $v_2 = -6$ м/с, $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7}$ м²/с
 Fig. 3. Temperature dependences of a drop (particle) in the process of dehydration:
 $1 - v = 2$ m/s, $D_{ef} = 10^{-8}$ m²/s; $2 - v = -1$ m/s, $D_{ef} = 5 \cdot 10^{-7}$ m²/s; $3 - v_1 = 5$ m/s, $v_2 = -6$ m/s, $D_{ef} = 5 \cdot 10^{-7}$ m²/s

Повышение относительной скорости движения фаз и времени пребывания частиц в области интенсивного излучения, вблизи излучателей, возможно за счет создания встречных пульсирующих потоков газа с большой амплитудой колебаний скорости, а также встречных потоков газа в сочетании с нижним импульсным потоком. Так, создание импульсного режима встречных потоков теплоносителя с амплитудой скорости верхнего потока $v_1 = 2$ м/с, а нижнего $-v_2 = -3,5$ м/с и частотой 2,0 Гц для частицы с приведенными параметрами позволяет ускорить процесс дегидратации по сравнению с рассмотренными выше режимами (кривая 9). Колебания (циклы) скорости верхнего и нижнего потоков осуществляются в противофазе. При включении верхнего потока нижний отключается и наоборот. Увеличение амплитуды колебаний потоков приводит к дальнейшему росту скорости дегидратации (кривая 10).

Сравнение экспериментальных данных, полученных Д. И. Полищуком, с расчетными результатами по кинетике испарения капли воды представлено на рис. 2. Видно, что при исследованных параметрах, скорости воздуха $v = 0,5$ м/с и температуре 100 °С квадрат диаметра капли изменяется от времени по линейной зависимости, при этом наблюдается хорошее соответствие расчетных и опытных данных.

На температурных кривых, показанных на рис. 3, отчетливо выделяется период прогрева капли (частицы) для исследуемых режимов. Следует отметить, что вначале температура капли повышается от начальной температуры (t_n) до температуры мокрого термометра ($t_{м.т.}$). Далее температура капли медленно возрастает, незначительно отличаясь от температуры мокрого термометра, что наиболее характерно для менее интенсивного режима. Затем скорость нагрева возрастает, и температура капли стремится к некоторому равновесному значению.

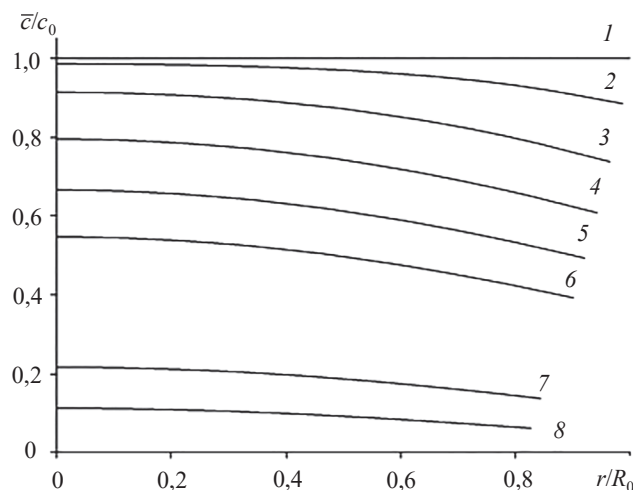


Рис. 4. Эволюция профиля концентрации влаги в частице: $v = 2$ м/с, $T_{\text{и}} = 1073$ К, $D_{\text{эф}} = 10^{-8}$ м²/с:
 $1 - \tau = 0$ с; $2 - 0,3$ с; $3 - 0,6$ с; $4 - 0,9$ с; $5 - 1,2$ с; $6 - 1,5$ с; $7 - 2,0$ с; $8 - 2,5$ с

Fig. 4. Evolution of the moisture concentration profile in a particle: $v = 2$ m/s, $T_{\text{e}} = 1073$ K, $D_{\text{ef}} = 10^{-8}$ m²/s:
 $1 - \tau = 0$ s; $2 - 0.3$ s; $3 - 0.6$ s; $4 - 0.9$ s; $5 - 1.2$ s; $6 - 1.5$ s; $7 - 2.0$ s; $8 - 2.5$ s

В ходе исследования было рассчитано поле концентрации влаги в частице и его эволюция во времени. Типичные зависимости концентрации по радиусу частицы приведены на рис. 4. Видно, что в начальный момент времени имеет место равномерное распределение влаги (кривая 1), а затем концентрация влаги в приповерхностном слое становится значительно ниже, чем в центре (например, кривые 2–5). Это свидетельствует об образовании на поверхности капли сухого слоя, то есть «корочки». При этом чем ниже коэффициент диффузии влаги и жестче режим, тем больше разность между концентрацией в центре частицы и на ее поверхности. При значении эффективного коэффициента диффузии влаги $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-7}$ м²/с эта разница незначительна. Образование «корочки» на поверхности концентрированных капель при их сушке наблюдалось и исследовалось в [14, 15].

На рис. 5 показано, что при стационарных режимах (кривые 1 и 2) в начале процесса наблюдается возрастание интенсивности испарения влаги, которая достигает максимального значения, а затем происходит ее убывание. При этом максимум скорости испарения приходится на период удаления свободной влаги. Противоточный режим движения фаз приводит к большей интенсивности испарения влаги. При импульсной скорости газа также имеет место максимум интенсивности испарения, значение которого значительно выше, чем при стационарных режимах. При этом зависимость интенсивности имеет колебательный характер с локальными экстремумами.

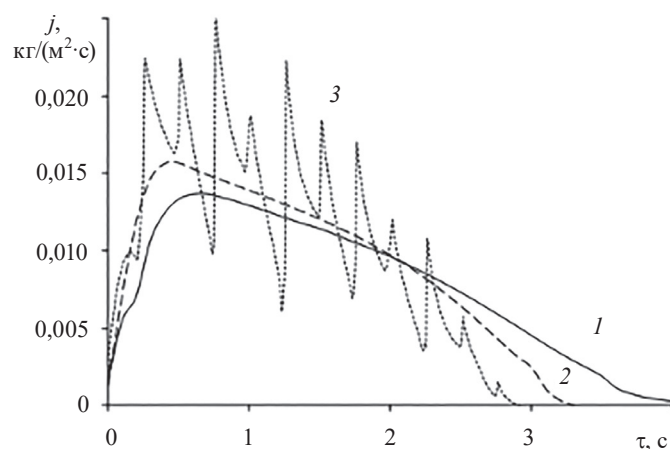


Рис. 5. Зависимости интенсивности испарения влаги от времени (обозначения кривых соответствуют параметрам на рис. 3)

Fig. 5. Dependences of the intensity of moisture evaporation on time (the designations of the curves correspond to the parameters in Fig. 3)

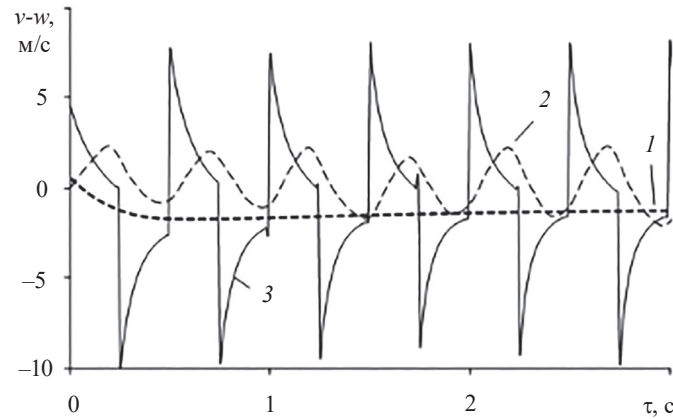


Рис. 6. Зависимости относительной скорости фаз от времени при $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $T_{и} = 1073 \text{ К}$:
 $1 - v = 0,5 \text{ м/с}$; $2 - v_1 = 2 \text{ м/с}$, $v_2 = -3,5 \text{ м/с}$; $3 - v_1 = 5 \text{ м/с}$, $v_2 = -6 \text{ м/с}$

Fig. 6. Dependences of the relative velocity of the phases on time at $D_{ef} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_e = 1073 \text{ K}$:
 $1 - v = 0.5 \text{ m/s}$; $2 - v_1 = 2 \text{ m/s}$, $v_2 = -3.5 \text{ m/s}$; $3 - v_1 = 5 \text{ m/s}$, $v_2 = -6 \text{ m/s}$

Было установлено, что для режима прямого движения фаз абсолютная величина относительной скорости вначале возрастает на разгонном участке, а затем мало изменяется (рис. 6, кривая 1). При небольшой амплитуде импульсных колебаний газа (рис. 6, кривая 2) максимумы относительной скорости фаз близки к стационарному режиму, то есть относительная скорость невысока. Однако этот режим приводит к значительному замедлению скорости падения частицы и возрастанию времени пребывания в интенсивной области инфракрасного излучения. Это приводит к росту скорости нагрева частицы и испарения влаги. Режим с большей скоростью колебаний газа увеличивает как относительную скорость, так и время пребывания частицы в области интенсивного ИК-излучения (рис. 6, кривая 3). О повышении времени пребывания свидетельствуют зависимости координаты частицы от времени (здесь не представлены).

Следует отметить, что зависимости площади поверхности капли от времени имеют вид подобный кинетическим кривым (рис. 7). В начале процесса наблюдается возрастание скорости изменения поверхности капли, затем зависимости близки к линейным, а далее скорость падает. Уменьшение скорости изменения поверхности обусловлено снижением концентрации влаги и ее градиента, а также возрастанием внутридиффузионного сопротивления при учете его зависимости от концентрации. Из приведенных на рис. 7 зависимостей видно, что наибольшая скорость изменения поверхности капли имеет место при импульсном режиме скорости встречных потоков газа и воздействии ИК-излучения (кривая 3). Следует отметить, что интенсификация

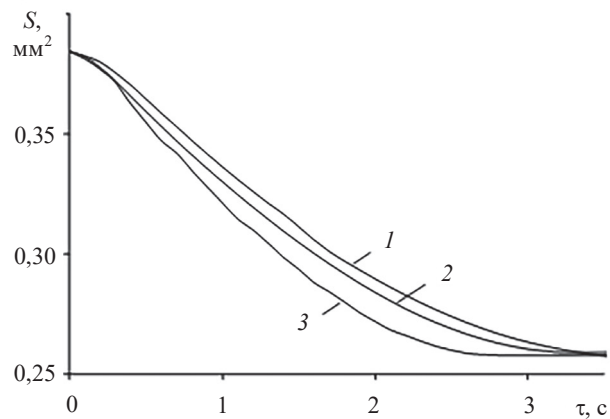


Рис. 7. Зависимости площади поверхности капли (частицы) от времени (обозначения кривых соответствуют параметрам на рис. 3)

Fig. 7. Dependences of the surface area of a drop (particle) on time (the designations of the curves correspond to the parameters in Fig. 3)

процесса дегидратации за счет ИК-излучения при исследованных режимах конвективного подвода теплоты ощутима при плотности падающего на частицу лучистого потока около 20–30 кВт/м² и выше. Поэтому для эффективного применения ИК-излучения в данном случае целесообразно создание лучистых потоков с большой интенсивностью.

Заключение. На основе моделирования дегидратации одиночной капли концентрированной жидкости исследовано влияние радиационно-конвективного энергоподвода в условиях прямо-точного и противоточного движения фаз, а также импульсных встречных потоков теплоносителя. В результате численного моделирования установлено, что при противоточном движении фаз интенсивность дегидратации выше, чем при прямотоке. Это обусловлено как повышением относительной скорости движения фаз, так и увеличением времени пребывания капли в интенсивной области ИК-излучения. Показано, что дальнейшая интенсификация испарения возможна за счет создания импульсных встречных потоков теплоносителя. Выполнено сравнение расчетных результатов с опытными данными, подтверждающее адекватность модели.

Результаты исследования могут быть полезны при разработке новых теплотехнологий и аппаратов для дегидратации концентрированных растворов и суспензий.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T22-008).

Acknowledgments

This work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T22-008).

Список использованных источников

1. Wisniewski, R. Spray Drying Technology Review [Electronic resource] / R. Wisniewski // 45th International Conference on Environmental Systems, 12–16 July 2015, Bellevue, Washington. – Mode of access: <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/64598>.
2. Феклунова, Ю. С. Разработка и научное обоснование способа распылительной сушки пюре из тыквы при конвективно-радиационном энергоподводе: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. С. Феклунова; ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань, 2015. – 20 с.
3. Акулич, П. В. Методы повышения эффективности процессов распылительной сушки / П. В. Акулич, В. А. Бородуля, Д. С. Слижук // Энергоэффективность. – 2018. – № 4. – С. 28–32.
4. Handbook of Industrial Drying / ed. by A. S. Mujumdar. – 4th ed. – CRC Press, 2014. – 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>
5. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
6. Акулич, П. В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета / П. В. Акулич, А. В. Акулич. – Минск: Выш. шк., 2019. – 376 с.
7. Рудобашта, С. П. Современное состояние и направления развития теории и практики сушки / С. П. Рудобашта // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы), СЭТТ – 2020: сб. науч. тр. 7-й междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13–15 окт. 2020 г. – М.: ООО «Мегаполис», 2020. – С. 13–22.
8. Pulse Combustion Spray Drying of Egg White / Zhonghua Wu [et al.] // Food and Bioprocess Technology. – 2015. – Vol. 8, № 1. – P. 148–157. <http://doi.org/10.1007/s11947-014-1384-9>
9. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости / В. И. Терехов [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 5. – С. 829–836.
10. Varghese, S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions / S. Varghese, S. Gangamma // Aerosol Air Qual. Res. – 2007. – Vol. 7, iss. 1. – P. 95–105. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2006.11.0028>
11. Mezhericher, M. The Influence of Thermal Radiation on Drying of Single Droplet/Wet Particle / M. Mezhericher, A. Levy, I. Borde // Drying Technology. – 2008. – Vol. 26, iss. 1. – P. 78–89. <http://doi.org/10.1080/07373930701781686>
12. Акулич, П. В. Термогидродинамические процессы при распылительной сушке в условиях конвективно-радиационного энергоподвода / П. В. Акулич, Д. С. Слижук // Теор. основы хим. технологии. – 2021. – Т. 55, № 1. – С. 34–45. <https://doi.org/10.31857/S0040357121010024>
13. Блох, А. Г. Основы теплообмена излучением / А. Г. Блох. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 332 с.
14. Тутова, Э. Г. Сушка продуктов микробиологического производства / Э. Г. Тутова, П. С. Куц. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.
15. Долинский, А. А. Распылительная сушка: в 2 т. / А. А. Долинский, К. Д. Малецкая. – Киев: Академперіодика, 2011. – Т. 1: Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. – 376 с.

References

1. Wisniewski R. Spray Drying Technology Review. *45th International Conference on Environmental Systems, 12–16 July 2015, Bellevue, Washington*. Available at: <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/64598>
2. Feklunova Yu. S. *Development and Scientific Substantiation of the Method of Spray Drying of Pumpkin Puree with Convective-Radiation Energy Supply*. Astrakhan, 2015. 20 p. (in Russian).
3. Akulich P. V., Borodulya V. A., Slizhuk D. S. Methods for improving the efficiency of spray drying processes. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, 2018, no. 4, pp. 28–32 (in Russian).
4. Mujumdar A. S. (ed.). *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed. CRC Press, 2014. 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>
5. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
6. Akulich P. V., Akulich A. V. *Convective Drying Installations: Methods and Examples of Calculation*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2019. 376 p. (in Russian).
7. Rudobashta S. P. Current state and directions of development of the theory and practice of drying. *Sovremennye energosberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i teplovye protsessy), SETT – 2020: sbornik nauchnykh trudov 7-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 13–15 oktyabrya 2020 g.* [Modern Energy-Saving Thermal Technologies (Drying and Thermal Processes), SETT – 2020: Collection of Scientific Papers of the 7th International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 13–15, 2020]. Moscow, Megapolis Publ., 2020, pp. 13–22 (in Russian).
8. Zhonghua Wu, Lian Yue, Zhanyong Li, Jun Li, Mujumdar A. S., Rehkopf J. A. Pulse Combustion Spray Drying of Egg White. *Food Bioprocess Technology*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 148–157. <http://doi.org/10.1007/s11947-014-1384-9>
9. Terekhov V. I., Terekhov V. V., Shimkin N. E., Bi K. Ch. Heat and mass transfer in disperse and porous media experimental and numerical investigations of nonstationary evaporation of liquid droplets. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 5, pp. 883–890. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0410-7>
10. Varghese S., Gangamma S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions. *Aerosol and Air Quality Research*, 2007, vol. 7, iss. 1, pp. 95–105. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2006.11.0028>
11. Mezhericher M., Levy A., Borde I. The Influence of Thermal Radiation on Drying of Single Droplet/Wet Particle. *Drying Technology*, 2008, vol. 26, iss 1, pp. 78–89. <http://doi.org/10.1080/07373930701781686>
12. Akulich P. V., Slizhuk D. S. Thermohydrodynamic Processes in Spray Drying with Convective-Radiation Energy Supply. *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, 2021, vol. 55, no. 1, pp. 30–40. <https://doi.org/10.1134/S0040579521010024>
13. Bloch A. G. *Fundamentals of Heat Transfer by Radiation*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 332 p. (in Russian).
14. Tutova E. G., Kuts P. S. *Drying of Products of Microbiological Production*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 303 p. (in Russian).
15. Dolinsky A. A., Maletskaya K. D. *Spray Drying: in 2 volumes. Volume 1. Thermophysical Fundamentals. Methods of Intensification and Energy Saving*. Kyiv, Akadempriodika Publ., 2011. 376 p. (in Russian).

Информация об авторах

Акулич Петр Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4559-8996>. E-mail: akul@hmti.ac.by

Седнин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-8039-3737>. E-mail: pte@bntu.by

Позднякова Марина Игоревна – старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pte@bntu.by

Information about the authors

Piotr V. Akulich – Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4559-8996>. E-mail: akul@hmti.ac.by

Vladimir A. Sednin – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department “Industrial Heat Power Engineering and Heat Engineering” of the Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-8039-3737>. E-mail: pte@bntu.by

Marina I. Pozdnyakova – Senior Lecturer of the Department “Industrial Heat Power Engineering and Heat Engineering”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pte@bntu.by