

УДК 532.5:66.047

## ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРОЦЕССАХ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ ПРИ КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ

© 2023 г. П. В. Акулич<sup>а</sup>, \*, Д. С. Слижук<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН, Беларуси, Минск

\*e-mail: akul@hmti.ac.by

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 06.06.2023 г.

Приведены математическая модель, результаты численного моделирования и экспериментальных исследований тепломассообменных процессов и параметров работы опытной распылительной установки для дегидратации концентрированных растворов при конвективно-радиационном энергоподводе. Показана возможность интенсификации тепломассообменных процессов и увеличения влагонапряженности камеры, производительности по испаренной влаге при снижении удельного расхода теплоты за счет воздействия инфракрасного излучения на область факела распыленной жидкости и создания режима встречных вертикальных потоков теплоносителя.

*Ключевые слова:* распылительная сушка, конвективно-радиационная сушка, тепломассообмен при дегидратации

**DOI:** 10.31857/S0040357123040012, **EDN:** VJKWTG

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время распылительные установки находят широкое применение для сушки большого количества жидких материалов в различных отраслях промышленности. Областью их применения являются производства высококачественных мелкодисперсных, гранулированных, быстрорастворимых, ультрадисперсных (нанодисперсных) материалов. Тем не менее, данные технологии характеризуются высокой энергоемкостью и особенно при обезвоживании высоковлажных и термостабильных материалов [1–5]. При этом распылительные установки имеют низкий съем влаги с единицы объема камеры, прежде всего при невысоких температурах теплоносителя. В связи с этим проблемам повышения их эффективности и разработки новых перспективных технологий и аппаратов в настоящее время уделяется большое внимание [1, 2, 5–8]. Развиваются различные методы повышения эффективности, например, многостадийные технологии обезвоживания (выпаривания и сушки, распылительной сушки и досушивания материала в кипящем и виброкипящем слоях); совершенствуются способы предварительной подготовки растворов и суспензий, включая подогрев и перегрев термостойких жидкостей; модернизируются системы диспергирования и ввода в факел распыла дисперсной фазы; ведутся поиски активизации гидродинамического режима на основе струйных, закрученных и

сильно нестационарных потоков теплоносителя, генерируемых камерами пульсационного горения. Большое внимание уделяется разработке перспективных технологий и новых материалов методом распыления.

В последнее время находят развитие исследования конвективно-радиационного подвода энергии в процессах распылительной сушки. Так, в работе [9] рассматривается конвективно-радиационный способ сушки распылением, в котором поток излучения создается за счет нагрева стенок камеры или от нагревателя расположенного по оси цилиндрической камеры. Известна конструкция распылительной установки [10], в которой инфракрасные излучатели расположены на боковой поверхности между жалюзи, через которые подается дополнительный поток теплоносителя. В работах [11–13] приведено описание конвективно-радиационного способа распылительной сушки и некоторые результаты его исследования. Сущность способа состоит в комбинированном энергвоздействии на капли распыляемой жидкости конвекцией и инфракрасным (ИК) излучением, фокусируемым на область факела распыла.

С развитием численных методов и программных комплексов для оптимизации процессов и поиска путей повышения их эффективности все шире применяются различные методы моделирования. Они часто основываются на механике сплошных сред, раздельном описании движения

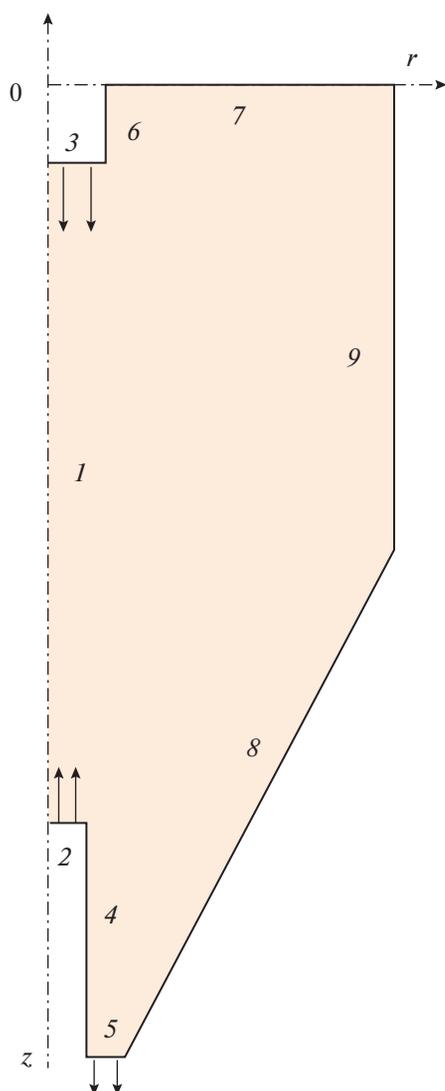


Рис. 1. Схема расчетной области модели.

фаз с учетом тепломассообмена дисперсных частиц, воспроизведении структуры потоков на основе идеализации их смешения. Вместе с тем решение задач, как правило, осложняется влиянием множества факторов и взаимосвязанных процессов. При сушке капель растворов, в частности, происходит образование неоднородной структуры твердой фазы, изменение физико-химических свойств и механизмов переноса [1, 14, 15]. Развиваются исследования тепломассообмена капель в условиях комбинированных энергетических воздействий, в том числе конвективно-радиационных, сильно нестационарных термогидродинамических течений, изучаются закономерности испарения малых капель и циркуляции одно- и многокомпонентных жидкостей внутри капель [16–20].

В работе [21, 22] приведены результаты исследования характеристик испарения одиночной не-

подвижной капли в условиях лучистого и конвективного нагрева.

Эффекты микровзрывной фрагментации капель жидкостей с многокомпонентным составом в условиях интенсивного нагрева установлены достаточно давно, но их активные исследования проводятся лишь в последние десятилетия [23]. В последние годы опыты проводятся в режимах, соответствующих топочным и контактным теплообменным камерам. Отметим, что данные эффекты в определенной степени могут иметь место и в распылительных камерах при интенсивных режимах теплового воздействия, в частности высокотемпературных продуктов сгорания и инфракрасного излучения.

Для описания фазовых превращений жидкостей используются различные подходы и модели, которые условно разделяют на две группы “диффузионные” и “кинетические” по доминирующему фактору влияния на интенсивность отрыва и последующего переноса молекул от поверхности раздела сред. При моделировании процессов испарения и конденсации часто используется закон Герца–Кнудсена [24, 25].

Наиболее исследованы процессы конвективного тепломассообмена капель. Вместе с тем потребность широкого применения данных теплотехнологий вызывают развитие исследований и поиск новых методов повышения энергетической эффективности.

Целью работы является исследование влияния комбинированного конвективно-радиационного воздействия и встречных потоков теплоносителя на интенсивность тепломассообменных процессов при распылительной сушке.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

**Математическая модель.** Рассматривается цилиндрикоконическая сушильная камера (рис. 1).

Первичный поток теплоносителя (нагретый воздух) подается через газораспределительное устройство, установленное в верхней части камеры. Здесь же осуществляется ввод диспергированной жидкости. Вторичный поток теплоносителя вводится в нижней части камеры встречно верхнему потоку. В результате создается встречное вертикальное взаимодействие потоков. Вывод газовой фазы (теплоносителя) и высушенных частиц производится через нижнее сечение конической части аппарата.

Рассматривается движение монодисперсных частиц в несущей двухкомпонентной газовой фазе, состоящей из смеси сухого воздуха и водяного пара. Применяется подход динамики взаимопроникающих континуумов. Поскольку в данных аппаратах объемная концентрация частиц мала ( $\epsilon_2 \ll 1$ ), пренебрегается взаимодействием и столк-

новением частиц между собой. Пренебрегается также теплообменом и трением на стенках камеры. Задача решается в двухмерной постановке для стационарного процесса в цилиндрической системе координат.

Дифференциальные уравнения сохранения масс фаз, импульса и энергии имеют следующий вид [5, 6].

Уравнения сохранения масс фаз

$$\nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{v}_1) = nj, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_2 \mathbf{v}_2) = -nj, \quad (2)$$

сохранения числа дисперсных частиц

$$\nabla \cdot (n\mathbf{v}_2) = 0, \quad (3)$$

сохранения массы водяных паров

$$\nabla \cdot (\rho_3 \mathbf{v}_1) = nj. \quad (4)$$

Приведенные плотности фаз  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , характеризующие массы фаз в единице объема смеси (дисперсная фаза + несущая фаза)

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 &= 1, \quad \varepsilon_2 = \pi d^3 n / 6, \quad \rho_1^0 = \rho_1 / (1 - \varepsilon_2), \\ \rho_2^0 &= \rho_2 / \varepsilon_2, \quad \rho_3^0 = \rho_3 / \varepsilon_1. \end{aligned}$$

Уравнения импульса фаз

$$\begin{aligned} \rho_1 (\mathbf{v}_1 \cdot \nabla) \mathbf{v}_1 &= \\ &= \left(1 - \frac{3}{2} \varepsilon_2\right) [-\nabla p - n\mathbf{f} + nj(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_2 (\mathbf{v}_2 \cdot \nabla) \mathbf{v}_2 &= \\ &= \left(1 - \frac{3}{2} \varepsilon_2\right) n\mathbf{f} + \frac{3}{2} \varepsilon_2 nj(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) + \rho_2 \mathbf{g}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения сохранения энергии фаз

$$\nabla \cdot [(E_1 + p) \mathbf{v}_1] = -nq, \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (E_2 \mathbf{v}_2) = nq - jr_n. \quad (8)$$

Полная энергия фаз (сумма внутренней и кинетической энергии), поток теплоты к дисперсной фазе и уравнение состояния

$$E_i = \rho_i \left( e_i + \frac{|\mathbf{v}_i|^2}{2} \right), \quad \text{где } i = 1, 2.$$

$$\begin{aligned} e_1 &= c_1 T_1, \quad e_2 = c_2 T_2, \quad q = \pi d \lambda_1 \text{Nu} (T_1 - T_{2R}), \\ p &= \rho_1^0 R^* T_1 / M_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Предполагается условие равновесия фаз на межфазной границе  $T_{2R} = T_s(p)$ . При этом пренебрегается тепловым сопротивлением внутри частиц  $T_2 = T_{2R}$ . Следует отметить, что при решении приведенных уравнений вводились диффузионные члены.

Интенсивность массообмена от твердой фазы к газовой, приходящаяся на одну дисперсную частицу:

$$j = \pi d \text{Sh} (\rho_{3s}^0 - \rho_3^0), \quad \rho_{3s}^0 = p_s M_3 / (R^* T_2). \quad (10)$$

Зависимость давления  $p_s$  насыщения водяных паров от температуры определялась по формуле Антуана.

Капли жидкости (раствора или суспензии) на входе в камеру имеют начальный диаметр  $d_0$ . В начале процесса испарение влаги сопровождается уменьшением диаметра частиц до некоторого постоянного значения  $d_*$ , а затем остаточная влага испаряется при постоянном размере частиц. Если текущий диаметр частицы больше  $d_*$ , то диаметр частицы находится из выражения

$$d = \left( d_0^3 - \frac{6 \Delta V_k}{\pi} \right)^{1/3}, \quad \text{где } \Delta V_k = \frac{1}{\rho_{ж}} \left( m_0 - \frac{\rho_2}{n} \right). \quad (11)$$

Если  $d \leq d_*$ , то  $d = d_*$ .

Сила межфазного трения, действующая на одну частицу, равна

$$\mathbf{f} = \frac{1}{8} \xi \pi d^2 \rho_1^0 |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2| (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2). \quad (12)$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления каплей определяется по зависимости Брауэра

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.4, \quad (13)$$

где  $\text{Re} = d |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2| / \nu$ ,  $|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2| = \sqrt{(v_1 - v_2)^2 + (u_1 - u_2)^2 + (w_1 - w_2)^2}$ .

Коэффициент теплоотдачи определяется по корреляции Фреслинга  $\text{Nu} = 2 + 0.55 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.33}$ . По аналогичному выражению определялся коэффициент массоотдачи. Влажность частиц определяется как  $W_2 = (m_2 - m_c) / m_2$ , где  $m_2 = \rho_2 / n$ . Влажностное содержание частиц, определяемое на массу сухого вещества  $U_2 = W_2 / (1 - W_2)$ .

Коэффициент диффузии водяных паров в воздухе  $D_n = D_0 (p_0 / p) (T / T_0)^{1.8}$ , где  $D_0 = 22 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ .

Количество теплоты, выделяемое в частицах материала при воздействии инфракрасного излучения определяется на основе закона Бугера

$$I = \varepsilon_2 q_0 k \exp(kz) \quad \text{при } z \leq 0, \quad (14)$$

где  $k$  – показатель поглощения,  $k = 0.75 \pi d^2 n$ .

Удельная изобарная теплоемкость несущей фазы  $c_1 = (c_4 + c_3 U_1) / (U_1 + 1)$ , где  $U_1 = \rho_3^0 / (\rho_1^0 - \rho_3^0)$ .

Граничные условия на оси симметрии и стенках аппарата

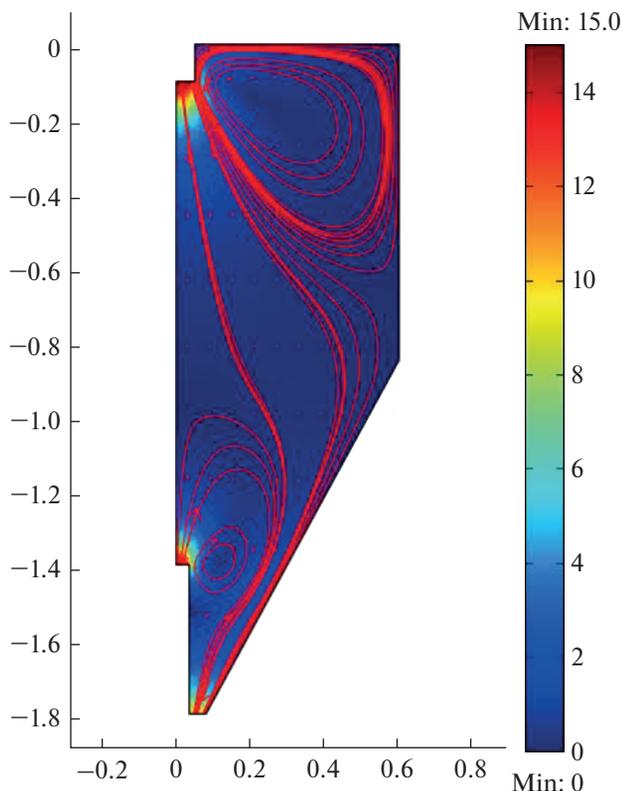


Рис. 2. Поле скоростей (поверхность), линии тока и векторы скорости газовой фазы.

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_1 &= 0, & \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_2 &= 0, & \mathbf{n} \cdot \nabla \rho_2 &= 0, \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \rho_3 &= 0, & \mathbf{n} \cdot \nabla n &= 0, & \mathbf{n} \cdot \nabla T_1 &= 0, \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T_2 &= 0, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{n}$  – направление внешней нормали; на входе в аппарат (граница 2 и 3)  $T_1 = T_{10}$ ,  $T_2 = T_{20}$ ,  $\rho_1 = \rho_{10}$ ,  $\rho_2 = \rho_{20}$ ,  $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_{10}$ ,  $\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_{20}$ , а на выходе (граница 5)  $p = p_0$ .

Основные геометрические размеры аппарата: диаметр цилиндрической части – 1.2 м, ее высота – 0.85 м; высота конической части – 0.95 м; диаметр входного канала для подачи первичного (верхнего) потока теплоносителя – 0.1 м, его высота от перекрытия камеры – 0.1 м; диаметр входного отверстия канала для подачи вторичного (нижнего) потока теплоносителя – 0.07 м, а его высота от конического основания – 0.4 м; диаметр выходного отверстия нижнего основания конуса – 0.16 м.

Основные параметры:  $v_{1в} = -15$  м/с;  $v_{1н} = 15$  м/с;  $T_{10} = 423$  К;  $T_{20} = 293$  К;  $p_0 = 1 \times 10^5$  Па;  $G_2 = 16$  кг/ч;  $d_0 = 0.0002$  м;  $c_3 = 1883$  Дж/(кг К);  $c_4 = 1024$  Дж/(кг К);  $R^* = 8.314$  Дж/(моль К);  $r_{п} = 2333$  кДж/кг;  $W_0 = 0.6$  кг/кг;  $\rho_{20} = 900$  кг/м<sup>3</sup>;  $v_{2в} = G_2 / (\rho_{20} S_B)$ ;  $\rho_{2в} = G_2 / (S_B |v_{1в}|)$ ;  $\rho_{1в} = p_0 / (M_1 T_{10})$ ;  $T_{изл} = 973-1073$  К;

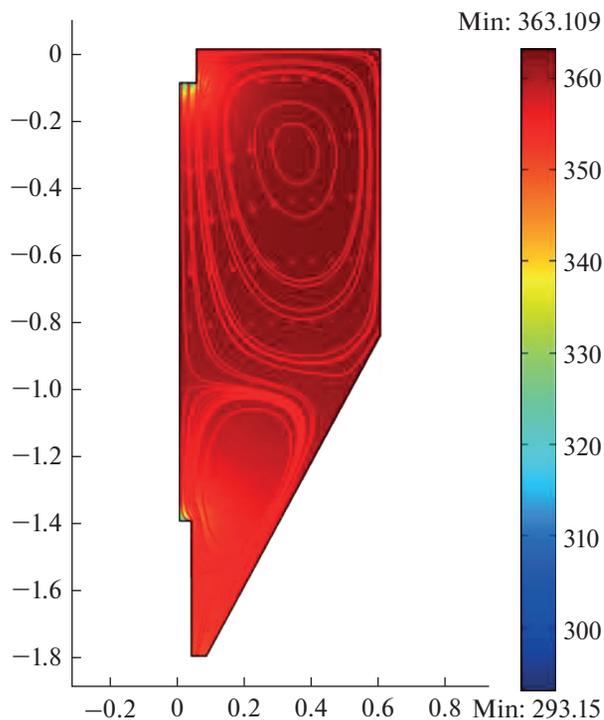


Рис. 3. Поле температур (поверхность), линии тока и векторы скорости твердой фазы.

$S_B = 7.85 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Для стационарной двухмерной задачи получено численное решение вышеприведенной системы уравнений с использованием программы “Comsol”.

**Обсуждение результатов численного моделирования.** Установлены зависимости гидродинамических и теплообменных параметров для различных режимов работы распылительной камеры. В частности, из анализа линий тока газовой и дисперсной фаз при встречных потоках теплоносителя и инфракрасном воздействии видно, что в периферийной зоне камеры образуется две области завихренности газовой и дисперсной фаз (рис. 2 и 3).

Одна имеет место в верхней части камеры, вторая – в нижней ее части. При соударении потоков теплоносителя происходит их растекание в периферийную зону с образованием вихрей, которые вызывают подобные образования вихрей дисперсной фазы. Подобная картина движения фаз наблюдается и при отсутствии инфракрасного облучения. В режиме прямого ввода фаз, т.е. отсутствия нижнего подвода теплоносителя, завихренности газовой и дисперсной фаз наблюдаются только в верхней области камеры. Следует отметить, что образование вихрей в верхней области камеры вызывает забрасывание влажных дисперсных частиц на перекрытие и возможно образование отложений при дегидратации адгезион-

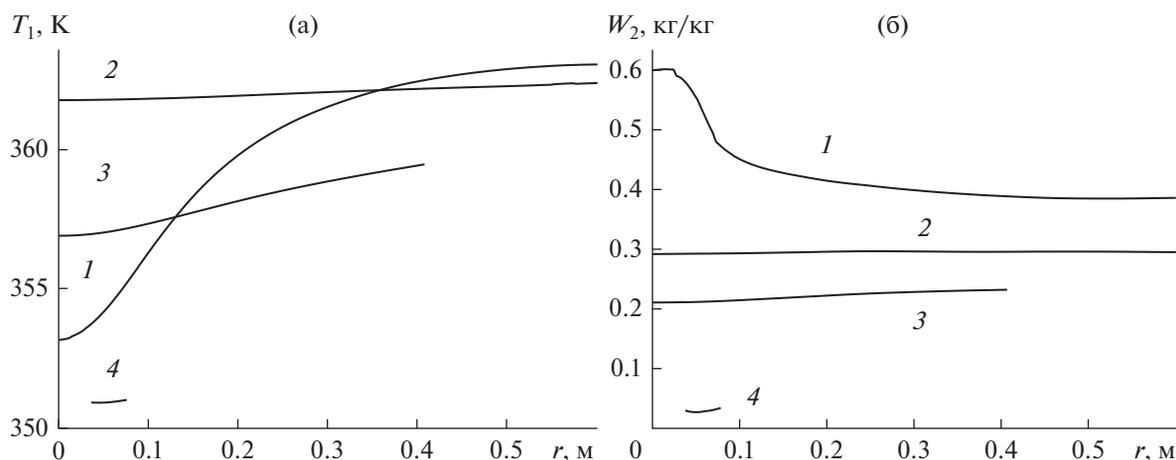


Рис. 4. Зависимости температуры газа (а) и влажности частиц (б) в различных сечениях камеры: а –  $l - z = 0.2$  м; 2 – 0.77; 3 – 1.2; 4 – 1.8; б –  $l - z = 0.1$  м; 2 – 0.6; 3 – 1.2; 4 – 1.8.

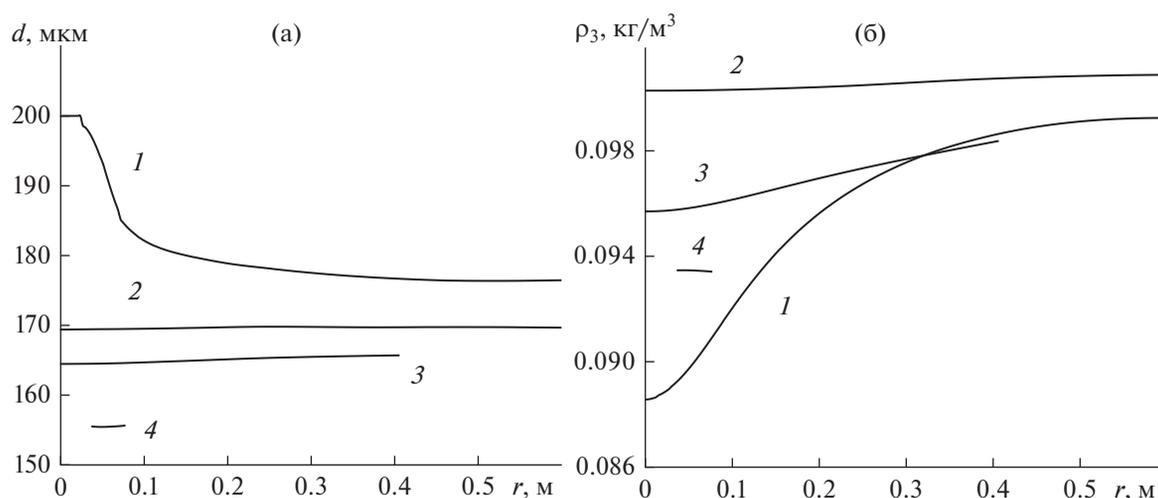


Рис. 5. Зависимости диаметра частиц (а) и концентрации водяных паров (б) в различных сечениях камеры при конвективно-радиационном энергоподводе: а –  $l - z = 0.1$  м; 2 – 0.6; 3 – 1.2; 4 – 1.8; б –  $l - z = 0.2$  м; 2 – 0.6; 3 – 1.2; 4 – 1.8.

ных материалов. Поэтому следует стремиться к предотвращению данного явления.

Температура несущей фазы на границах ввода соответствует заданным значениям. При этом в области верхнего ввода теплоносителя, где также подается жидкость, т.е. в зоне факела распыленной жидкости происходит значительное снижение температуры теплоносителя (кривая 1, рис. 4).

В периферийной зоне и нижерасположенных сечениях камеры температура газовой фазы возрастает, что обусловлено воздействием ИК-излучения. При приближении к выходу теплоносителя его температура падает. Расчетные зависимости по уровню температур согласуются с полученными опытными данными. Температура частиц вне области факела распыла выше температуры мокрого термометра, что обусловлено влиянием

ИК-излучения. В области выхода из камеры температуры частиц и газа сближаются.

Влажность частиц максимальна в месте их ввода и далее снижается по высоте камеры, причем профиль влажности по радиусу камеры выравнивается (рис. 4б). Подобный характер имеют зависимости диаметра частиц, приведенные на рис. 5а.

Концентрация водяных паров минимальна в области ввода теплоносителя и жидкости. Затем профили концентрации выравниваются по радиусу камеры и значения концентрации возрастают, а затем снижаются по мере приближения к выходному сечению (рис. 5б). При чисто конвективном энергоподводе профиль концентрации водяных паров в верхнем сечении камеры имеет подобный вид, однако значения концентрации заметно ниже (рис. 6а). В более нижних сечениях

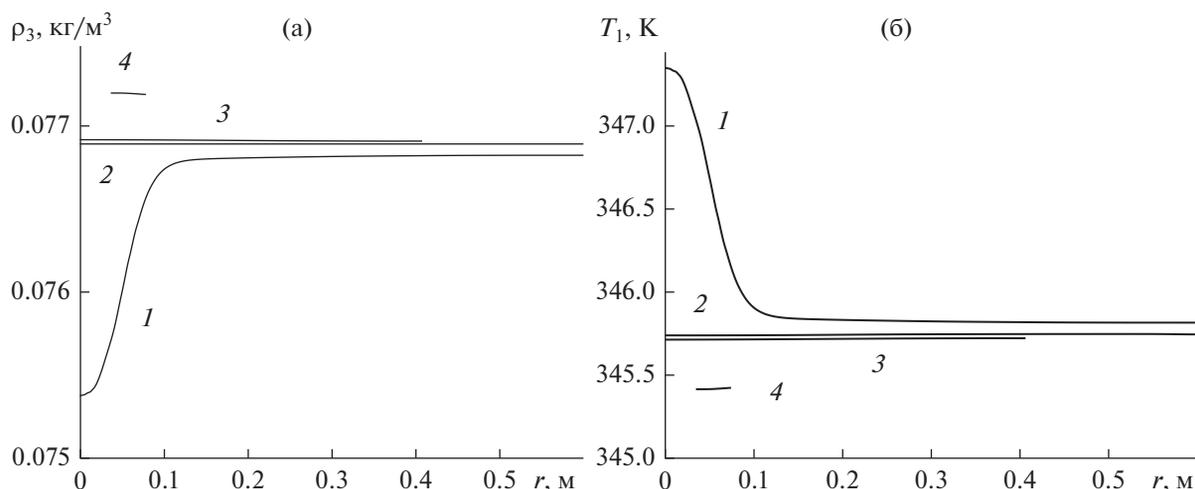


Рис. 6. Зависимости концентрации водяных паров (а) и температуры газовой фазы (б) в различных сечениях камеры при конвективном энергоподводе: а – 1 –  $z = 0.15$  м; 2 – 0.77; 3 – 1.2; 4 – 1.8.

профили выравниваются, причем в отличие от конвективно-радиационного энергоподвода значения концентрации возрастают при приближении к выходу теплоносителя из камеры.

Как и следовало ожидать, температура теплоносителя при конвективном энергоподводе наиболее высокая в области его ввода, причем она быстро снижается по вертикальной координате (рис. 6б). Температурный профиль выравнивается, а уровень температуры падает. Расчетная температура на выходе из камеры для данного режима составляет около 72°C и близка к опытным значениям, поддерживаемым на уровне 70°C. Сравнивая температурные поля для рассматриваемых режимов, отчетливо видно значительное влияние радиационного воздействия.

Следует отметить, что при конвективно-радиационном энергоподводе значительно выше производительность аппарата по влажному материалу  $G_2 = 16$  кг/ч, а следовательно и по испаренной влаге, по сравнению с конвективным способом  $G_2 = 7$  кг/ч.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнены экспериментальные исследования параметров распылительной установки при конвективном и конвективно-радиационном энергоподводах. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 7.

Она работает следующим образом. В сушильную камеру 1 распылителем 5 диспергируется высушиваемый раствор, который подается из емкости 7. Теплоноситель вводят в камеру двумя потоками: сверху на факел распыла через газораспределительное устройство 2 и снизу по оси камеры через канал 13, который снабжен завихрителем 14. Ввод

нижнего теплоносителя создает встречное взаимодействие вертикальных потоков, что активизирует гидродинамический режим и увеличивает время пребывания частиц в наиболее интенсивной зоне инфракрасного излучения. В качестве теплоносителя используется воздух, который нагревается в электрических калориферах 3, 4 и 15.

На факел жидкого материала воздействуют инфракрасным излучением с помощью излучателей 6. В специальном устройстве закреплено 9 инфракрасных керамических излучателей марки ИКН-101 мощностью 1 кВт, каждый из которых установлен в собственном корпусе с направляющим отражателем. Температура поверхности излучателей достигает 1073 К. Конструкция обеспечивает возможность изменения угла наклона излучателей к вертикальной оси. Теплота к распыленным частицам подводится конвекцией от теплоносителя и инфракрасным излучением, которое фокусируется на область факела излучателями 6, расположенными под углом к вертикальной оси. Высушенные частицы материала вместе с обработанным теплоносителем поступают в циклон 9, в котором сепарируются и попадают в сборник 11 для сухого продукта. Для диспергирования жидкостей используются двух- и трехканальные пневматические форсунки 5, последние позволяют вводить в факел распыла дисперсный материал – наполнитель, который подается дозатором 8. Пневматическая форсунка 5 расположена по оси инфракрасного устройства в верхней его части. При этом факел распыла жидкости находится в зоне максимального воздействия излучателей.

При необходимости стенки циклона охлаждаются водой, подаваемой в рубашку 10, для предотвращения налипания термопластичных

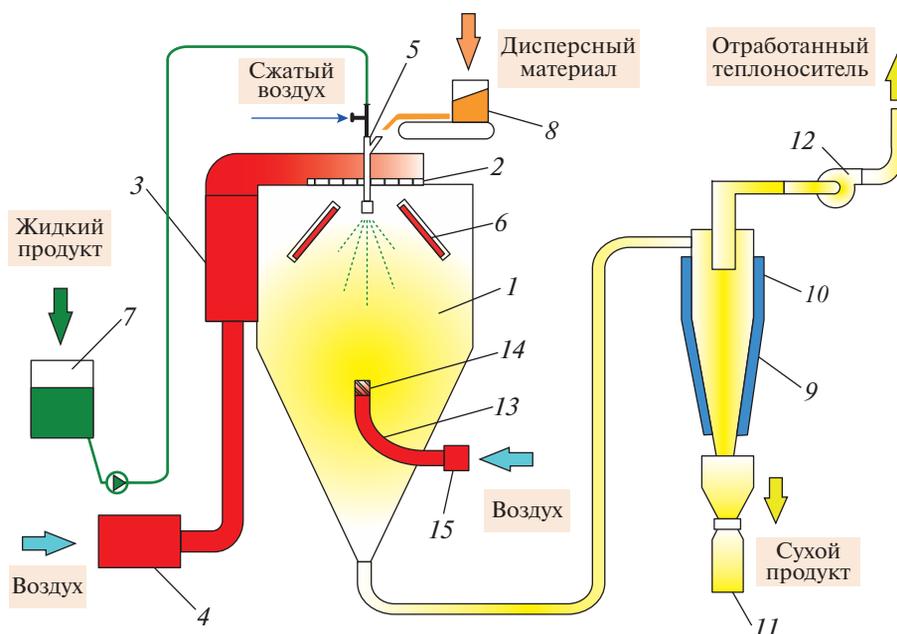


Рис. 7. Схема распылительной установки с конвективно-радиационным подводом теплоты и встречными потоками теплоносителя.

материалов. Теплоноситель подается в установку вентилятором 12.

Таким образом, в установке реализуется новый способ распылительной сушки, сущность которого состоит в комбинированном энерговоздействии на капли распыляемой жидкости конвекцией в условиях встречных потоков теплоносителя и инфракрасным излучением, фокусируемым на область факела с наибольшей концентрацией частиц [14, 15].

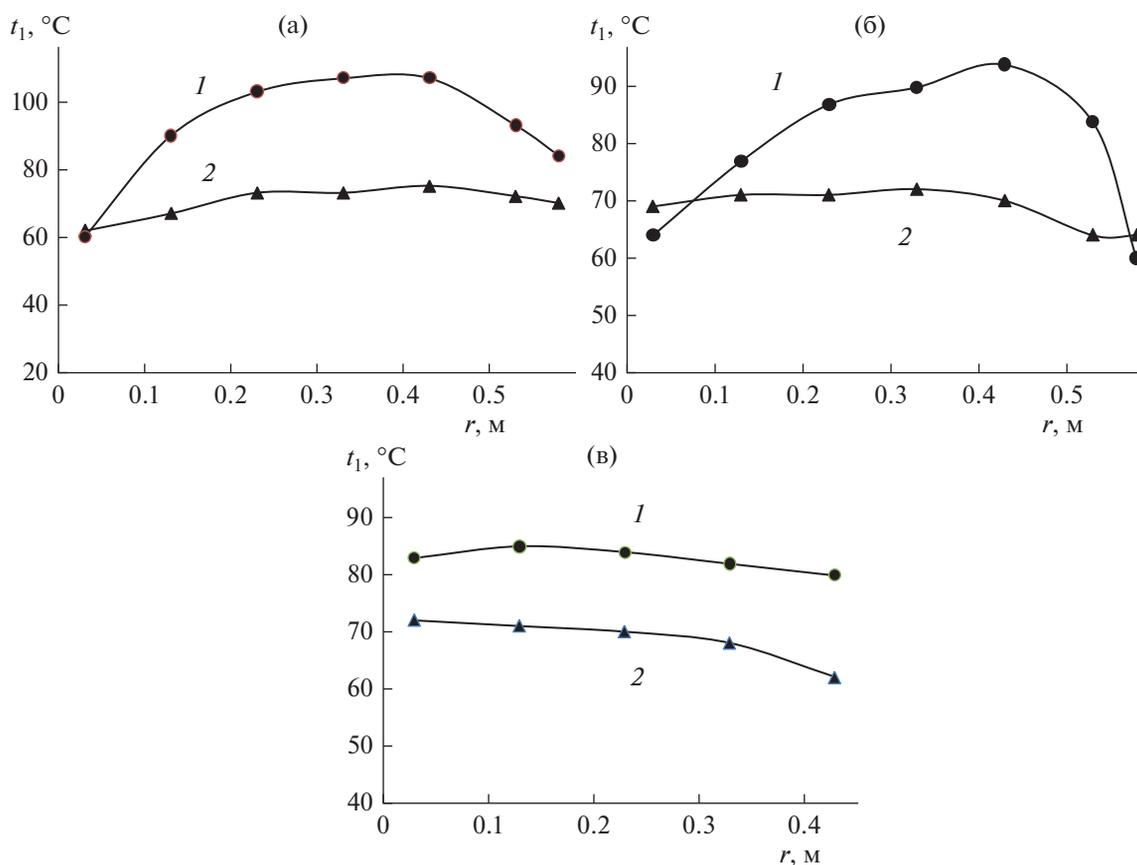
Для двух режимов работы установки получены экспериментальные температурные зависимости в различных сечениях камеры (рис. 8). Измерения температуры среды проводились хромель-копелевой термопарой. Последняя находилась в чехле цилиндрической формы, который служил экраном и предотвращал влияние инфракрасного излучения на показание термопары. При этом чехол подключался к вакуумному насосу и термопара оказывалась в потоке газа, температура которого и регистрировалась. Измерения проводились при температуре теплоносителя на входе в камеру

130°C и выходе – 70°C и установившемся режиме работы установки. Остальные параметры соответствовали данным в табл. 1 и 2. На рис. 8 видно, что температура несущей фазы выше во всех сечениях камеры при конвективно-радиационном энергоподводе по сравнению с чисто конвективным. Наибольшая разность температур наблюдается в верхних сечениях камеры. Температура газа при инфракрасном воздействии близка к 100°C в зоне ввода частиц жидкости, т.е. факеле распыла, и значительно ниже при конвективном подводе теплоты.

Определены параметры экспериментальной установки при сушке водного раствора NaCl с концентрацией 20% при конвективном и конвективно-радиационном энергоподводах. Результаты представлены в табл. 1 и 2. Анализ полученных данных свидетельствует о возможности значительного увеличения производительности установки по испаренной влаге при конвективно-радиационном энергоподводе по сравнению с чисто конвективным способом.

Таблица 1. Параметры распылительной установки со встречными потоками и конвективно-радиационным энергоподводом при сушке раствора NaCl (угол наклона излучателей к вертикали 30 град)

№ п/п	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_0$ , °C	$p$ , МПа	$V$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_k$ , кВт	$Q_{изл}$ , кВт	$G_2$ , кг/ч	$W$ , кг/ч	$q_{уд}$ , кДж/кг	$A_V$ , кг/(м <sup>3</sup> ч)
1	110	70	20	0.3	210	6.4	8.6	12.3	9.8	5510	10.2
2	130	70	20	0.3	210	7.8	8.5	15.7	12.6	4657	13.1
3	150	70	20	0.3	210	9.2	8.8	17.9	14.3	4531	14.9



**Рис. 8.** Температурные зависимости по сечению камеры: а –  $z = 520$  мм; б –  $z = 770$  мм; в –  $z = 1070$  мм. 1 – конвективно-радиационный энергоподвод со встречными потоками теплоносителя; 2 – конвективный подвод теплоты со встречными потоками (без инфракрасного излучения).

**Таблица 2.** Параметры распылительной установки со встречными потоками при конвективном энергоподводе при сушке раствора NaCl

№ п/п	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_0$ , °C	$p$ , МПа	$V$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_k$ , кВт	$Q_{\text{изл}}$ , кВт	$G_2$ , кг/ч	$W$ , кг/ч	$q_{\text{уд}}$ , кДж/кг	$A_V$ , кг/(м <sup>3</sup> ч)
1	110	70	19	0,3	210	6.4	0	2.78	2.2	10470	2.3
2	130	70	19	0,3	210	7.8	0	5.02	4	7020	4.2
3	150	70	19	0,3	210	9.2	0	7.3	5.8	5710	6.0

При температуре на входе в камеру  $130^\circ\text{C}$  и выходе из нее  $70^\circ\text{C}$  и установленной мощности излучателей 9 кВт производительность по испаренной влаге увеличивается в примерно в три раза. При этом очень важно, что удельный расход теплоты уменьшается примерно в полтора раза, а влагонапряженность объема камеры возрастает в три раза. Видно повышение энергоэффективности работы установки, которое достигается за счет интенсификации процессов теплообмена и сокращения удельного расхода теплоносителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель позволяет прогнозировать структуру течения фаз и теплообмен в распылительных аппаратах, выявлять возникновение обратных течений и определять температуру и влажностное содержание теплоносителя и частиц.

На основе теоретических и экспериментальных исследований показана возможность увеличения производительности установки по испаренной влаге и влажнапряженности камеры при снижении удельного расхода теплоты за счет воздействия инфракрасного излучения на область фа-

кела распыленной жидкости и создания режима встречных вертикальных потоков теплоносителя. Отметим, что способ конвективно-радиационной сушки может найти применение при дегидратации термостойких материалов, требующих интенсивной тепловой обработки. Вместе с тем следует иметь в виду, что эффективность данного способа зависит от множества факторов, в частности от интенсивности и фокусировки инфракрасного излучения, температуры теплоносителя, концентрации частиц в потоке и других параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований проект № Т22-008.

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A_V$	влажнапряженность камеры, кг/(м <sup>3</sup> ч)
$c$	теплоемкость, Дж/(кг К)
$d$	диаметр частиц, м
$D$	коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с
$E$	полная энергия, Дж/кг
$e$	внутренняя энергия, Дж/кг
$g$	ускорение свободного падения, м <sup>2</sup> /с
$G_2$	расход жидкости, кг/ч
$j$	интенсивность фазового превращения, кг/с
$k$	показатель поглощения излучения
$m_0, m_2$	начальная и текущая масса капли (частицы), кг
$M$	молекулярная масса, кг/моль
$n$	число частиц в единице объема
$p$	давление, Па
$q$	поток теплоты, Вт
$q_0$	плотность падающего излучения при $z = 0$ , Вт/м <sup>2</sup>
$q_{уд}$	удельный расход теплоты, кДж/кг влаги
$Q_k, Q_{изл}$	мощность калориферов и инфракрасных излучателей, кВт
$r, z$	координаты, м
$r_{п}$	теплота фазового превращения, Дж/кг
$R$	радиус частицы, м
$R^*$	универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К)
$S_B$	площадь сечения верхнего ввода теплоносителя, м <sup>2</sup>
$T, t$	температура, К и °С
$V_{1в}, V_{1н}$	соответственно скорость газа на границе верхнего и нижнего вводов теплоносителя, м/с
$v, w$	векторы скорости несущей и дисперсной фаз, м/с
$U$	влажносодержание (на сухую массу), кг/кг

$V_k$	объем капли, м <sup>3</sup> /ч
$W$	производительность установки по испаренной влаге, кг/ч
$W_2$	влажность частиц (на общую массу), кг/кг
$\epsilon$	объемная концентрация частиц, м <sup>3</sup> твердой фазы/м <sup>3</sup> смеси
$\lambda$	теплопроводность, Вт/(м К)
$\mu$	динамический коэффициент вязкости, Па с
$\nu$	кинематический коэффициент вязкости, м <sup>2</sup> /с
$\rho_i$	приведенная плотность фазы, определяющая массу фазы в единице объема смеси (твердая фаза+несущая фаза), кг/м <sup>3</sup>
$\rho_i^0$	плотность фазы при $n = 1, 2$ , плотность компонента фазы, определяющая массу компонента фазы, определяющая массу компонента в единице объема несущей фазы, при $n \neq 1, 2$ , кг/м <sup>3</sup>
$t$	время, с
$Re, Nu, Sh$	числа Рейнольдса, Нуссельта и Шервуда

### НИЖНИЕ ИНДЕКСЫ

1	несущая фаза
2	дисперсная фаза
3	водяные пары
4	сухой воздух
0	начальное (постоянное) значение
в, н	соответственно граница верхнего и нижнего ввода теплоносителя
ж	влага (вода)
изл	инфракрасное излучение
с	сухой материал
$R$	поверхность капли
$s$	насыщенное состояние

### ВЕРХНИЕ ИНДЕКСЫ

0	истинные значения
---	-------------------

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Долинский А.А., Малецкая К.Д.* Распылительная сушка: в 2-х томах. Т. 1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. Киев: Академперіодика, 2011.
2. Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition. Edited by Arun S. Mujumdar. CRC Press. 2014.
3. *Тугова Э.Г., Куц П.С.* Сушка продуктов микробиологического производства. М.: Агропромиздат, 1987.

4. Kudra T., Mujumdar A.S. *Advanced Drying Technologies*. New York. Marcel Dekker, Inc. 2002.
5. Акулич П.В., Драгун В.Л., Куц П.С. *Технологии и техника сушки и термообработки материалов*. Минск: Белорусская наука, 2006.
6. Акулич П.В., Акулич А.В. *Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета*. Минск: Высшая школа, 2019.
7. *Modern Drying Technology*. V. 5: Process Intensification / E. Tsotsas and A. S. Mujumdar (Eds.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany. 2014.
8. Wu Z., Yue L., Li Z. *et al.* Pulse Combustion Spray Drying of Egg White: Energy Efficiency and Product Quality. *Food Bioprocess Technology*. 2015. № 8. P. 148.
9. Richard Wisniewski. *Spray Drying Technology Review / NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 9403 // 45<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems 12–16 July 2015, Bellevue, Washington*. P. 1.
10. Фелдунова Ю.С. Разработка и научное обоснование способа распылительной сушки пюре из тыквы при конвективно-радиационном энергоподводе. Автореф. На соискан. Уч. Степени канд. Техн. Наук по спец. 05.18.12. ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань. 2015.
11. Акулич П.В. Способ сушки жидких материалов. Патент № 18467 Республики Беларусь на изобретение // *Официальный бюллетень*. 2013. № 2. С. 23.
12. Акулич П.В., Бородуля В.А., Слижук Д.С. Методы повышения эффективности процессов распылительной сушки // *Энергоэффективность*. 2018. № 4. С. 28.
13. Акулич П.В., Слижук Д.С. Термогидродинамические процессы при распылительной сушке в условиях конвективно-радиационного энергоподвода // *Теоретические основы химической технологии*. 2021. Т. 55. № 1. С. 34–45.
14. Акулич П.В. Тепломассообмен капли раствора при комбинированном энергетическом воздействии и углублении зоны испарения // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 3. С. 527.
15. Акулич П.В. Моделирование тепломассообмена капель при сушке перегретой жидкости в условиях комбинированного энергетического воздействия // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 2. С. 404.
16. Prakash S., Sirignano W.A. Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulating liquid phase // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1980. V. 23. P. 253.
17. Козырев А.В., Ситников А.Г. Испарение сферической капли в газе среднего давления // *Успехи физических наук*. Т. 171. № 7. 2001. С. 765.
18. Терехов В.И., Терехов В.В., Шимкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследование нестационарного испарения капель жидкости // *Инженерно-физический журнал*. 2010. Т. 83. № 5. С. 829.
19. Varghese S., Gangamma S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions // *Aerosol and Air Quality Research*. 2007. V. 7. № 1. P. 95.
20. Mezhericher M., Levy A., Borde I. The Influence of Thermal Radiation on Drying of Single Droplet/Wet Particle // *Drying Technology*. 2008. V. 26. Issue 1. P. 78.
21. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Кузнецов В.Т., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Влияние механизма теплообмена на динамику испарения одиночной капли жидкости / Тезисы докладов и сообщений XVI Минского международного форума по тепло- и массообмену, 16–19 мая 2022 г. // *Научное электронное издание*. Минск. 2021. С. 713. [https://www.itmo.by/conferences/abstracts/?ELEMENT\\_ID=20225](https://www.itmo.by/conferences/abstracts/?ELEMENT_ID=20225)
22. Бочкарева Е.М., Лей М.К., Терехов В.В., Терехов В.И. Особенности методики экспериментального исследования процесса испарения подвешенных капель жидкости // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 5. С. 2208.
23. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Aziz A.R.B.A. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. V. 131. P. 815.
24. Войтков И.С., Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Высокотемпературное испарение капель воды в газовой среде // *Журн. технической физики*. 2017. Т. 87. Вып. 12. С. 1911.
25. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.