

Научная статья
УДК 669.162.252.428
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ КАПЛИ ОКАЛИНОМАСЛОСОДЕРЖАЩЕГО ШЛАМА ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА

**Николай Николаевич Синицын¹, Наталья Владимировна Запатрина²,
Ирина Анатольевна Сарычева³, Юлия Владимировна Грибкова^{4✉},
Елена Викторовна Голицына⁵, Юлия Викторовна Донцова⁶**

^{1, 6} Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

^{1, 2, 3, 4, 5} Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники Минобороны России,
Череповец, Россия

¹ nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

² z_natalia777@mail.ru

³ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁴ 150475@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ iuvdontcova@chsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0647-3703>

Аннотация. В статье представлены исследования траектории движения одиночной жидкой капли шлама, содержащего воду, масло и железную окалину, в закрученном потоке высокотемпературного газа. Определены температурные поля в капле с учетом двухфазной зоны перехода воды из жидкого состояния в паровое, алгоритм расчета траектории движения капли в закрученном потоке газа при ее прогреве с учетом двухфазной зоны испарения воды. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать характерные размеры камеры сушки капель окалиномаслосодержащих шламов при ее проектировании, а также управлять процессом сушки капель, получающихся при дисковом распыле.

Ключевые слова: капля окалиномаслосодержащих шламов, высокотемпературная сушка, закрученный газовый поток, фазовый переход влаги

Для цитирования: Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Сарычева И. А., Грибкова Ю. В., Голицына Е. В., Донцова Ю. В. Математическое моделирование высокотемпературной сушки капли окалиномаслосодержащего шлама при ее движении в закрученном потоке газа // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 66–75. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75.

Original article

MATHEMATICAL SIMULATION OF HIGH-TEMPERATURE DRYING OF A DROP OF SCALE- AND OIL-CONTAINING SLUDGE WHEN MOVING IN A SWIRLING GAS FLOW

**Nikolay N. Sinitsyn¹, Natalya V. Zapatrina², Irina A. Sarycheva³,
Yuliya V. Gribkova^{4✉}, Elena V. Golitsyna⁵, Yuliya V. Dontsova⁶**

^{1, 6} Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

^{1, 2, 3, 4, 5} Military Order of Zhukov University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

¹ nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

² z_natalia777@mail.ru

³ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁴ 150475@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ iuvdontcova@chsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0647-3703>

Abstract. The article presents an examination of the movement trajectory of a single liquid drop of sludge containing water, oil, and iron scale in a swirling high-temperature gas flow. Taking into account a two-phase transition area from liquid water to vapor, temperature fields in a drop are determined, as is an algorithm for calculating the movement trajectory of a drop in a swirling gas flow when heating it up according to a two-phase area of water evaporation. When designing a drying chamber for drops of scale- and oil-containing sludge, a mathematical model helps predict its typical size as well as control the drying process for drops produced by a disk atomizer.

Keywords: a drop of scale- and oil-containing sludge, high-temperature drying, swirling gas flow, moisture phase transition

For citation: Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Sarycheva I. A., Gribkova Yu. V., Golitsyna E. V., Dontsova Yu. V. Mathematical simulation of high-temperature drying of a drop of scale- and oil-containing sludge when moving in a swirling gas flow. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):66–75. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75.

ВВЕДЕНИЕ

На металлургических предприятиях обрабатывается большой объем разнообразных по составу и концентрации загрязняющих веществ сточных вод, в том числе содержащих масло и окалину. Обработка их в системах водочистки приводит к образованию другого вида отходов – окалиномаслосодержащих шламов. Часть отходов представляет собой мелкодисперсные маслосодержащие шламы. Состав шламов, взятых из вторичных отстойников, колеблется в следующих пределах: вода 23–32 %, масло 15–31 %, твердые составляющие 38–60 %. Твердые фракции шламов практически полностью состоят из окалины и по химическому составу представляют собой смесь оксидов железа [1]. Содержание железа в сухой части шлама составляет 72 % [2–4]. Средняя истинная плотность окалины – 5 392 кг/м³, насыпная плотность – 2 703 кг/м³. Степень утилизации таких отходов не превышает 75 %. Установлено, что при полном испарении воды капля переходит в твердое состояние [5].

В [6] представлен алгоритм расчета и выполнено численное исследование теплообмена в закрученном газокапельном течении, аппарат со взвешенным слоем для концентрирования термолабильных жидкостей. Экспериментальное исследование испарения капель распыленного потока суспензий на основе воды [7] показало значительное влияние примесей на основную характеристику испарения – относительное изменение радиуса капель.

Целью представленной работы является исследование температурного поля одиночной капли окалиномаслосодержащего шлама

при ее движении в закрученном высокотемпературном потоке газа с учетом испарения влаги и определение траекторий движения, необходимых при прогнозировании характерных размеров распылительной камеры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. Принципиальную схему распылительной камеры можно представить в виде цилиндра 4, ограниченного двумя торцевыми поверхностями, к внутренней поверхности 3 которого тангенциально вводится газ через сопло 6, и отработанный газ отводится через патрубок 5 (рис. 1а).

Аэродинамика закрученного потока отличается большой сложностью и пространственностью. В любой точке вектор скорости можно разделить на три составляющие: тангенциальную w_ϕ , аксиальную w_z и радиальную w_r . Объем закрученного потока можно условно разделить на три области: осесимметричное ядро потока, состоящее из внутренней и внешней областей, приторцевые зоны течения и периферийную пристенную зону. Ядро потока занимает основную часть рабочего объема камеры. Внешней границей ядра потока является цилиндрическая поверхность радиусом r_λ . В пределах ядра потока тангенциальная составляющая скорости имеет наибольшую из всех трех компонент величину. В соответствии с характером ее распределения по радиусу можно выделить две зоны: зону возрастания скорости w_ϕ при уменьшении радиуса (квазипотенциальную зону) и зону ее падения по мере приближения к центру камеры (зону квазитвердого вращения) (рис. 1б).

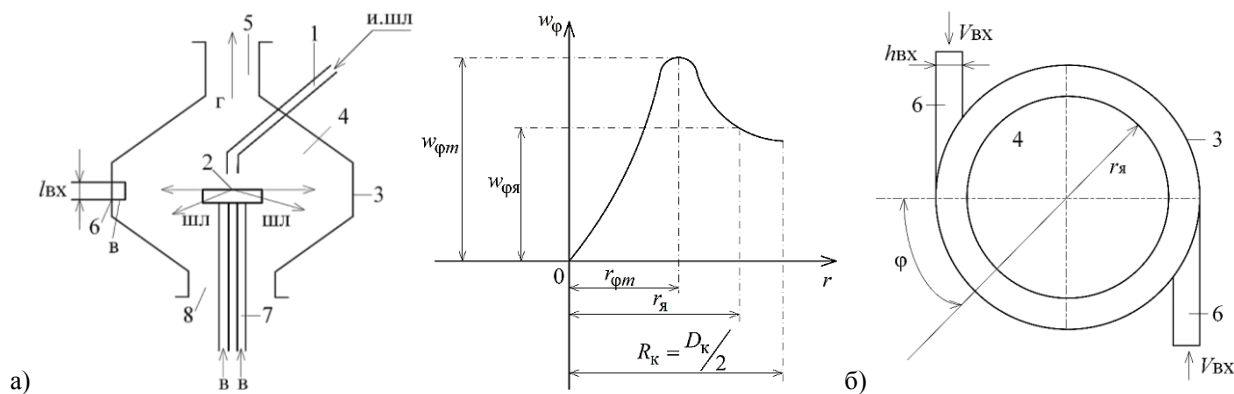


Рис. 1. Принципиальная схема распылительной камеры и распределение тангенциальной скорости:

- 1 – канал подачи исходного продукта; 2 – вращающийся диск; 3 – стенка распылительной камеры; 4 – цилиндр, представляющий распылительную камеру; 5 – патрубок выхода отработавшего газа; 6 – тангенциальное сопротивление горячего газа; 7 – подача холодного воздуха для охлаждения диска 2; 8 – канал удаления затвердевшего шлама; φ – угол; в – воздух; и. шл. – исходный шлам; шл. – капли шлама

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

При двух- и более стороннем вводе потока течение в ядре практически осесимметрично. Аэродинамическая ось потока совпадает с осью камеры.

Тангенциальная составляющая скорости в ядре потока значительно превышает другие компоненты скорости [8], поэтому основным видом движения здесь следует считать вращательное.

Распределение безразмерной тангенциальной скорости по радиусу камеры может быть описано формулами [8]:

- для внутренней зоны течения ($0 \leq \eta \leq 1$):

$$\bar{w}_\varphi = \frac{2\eta}{1+\eta} \cdot \bar{w}_{\varphi m}; \quad (1)$$

- для внешней зоны течения ($1 \leq \eta \leq \eta_{\text{я}}^l$):

$$\bar{w}_\varphi = \frac{2}{1+\eta} \cdot \bar{w}_{\varphi m}, \quad (2)$$

где $\eta = \frac{r}{r_{\varphi m}}$; $\bar{w}_\varphi = \frac{w_\varphi}{w_{\varphi m}}$ – относительная скорость;

w_φ – тангенциальная скорость потока;

$w_{\varphi m}$ – максимальная тангенциальная скорость при радиусе равном $r_{\varphi m}$;

$\eta_{\text{я}}^l$ – безразмерный радиус осесимметричного ядра потока;

$$\bar{r}_{\varphi m} = \frac{\bar{d}_{\text{ВЫХ}}}{\left(5 \cdot \frac{0,95}{\bar{d}_{\text{ВЫХ}}} - 1\right) \cdot \bar{f}_{\text{ВХ}} + 0,7} \quad \text{– безразмерный радиус, характеризующий положение максимума тангенциальной скорости в рабочем объеме аппарата при нулевой длине выходного канала;}$$

$\bar{d}_{\text{ВЫХ}} = \frac{d_{\text{ВЫХ}}}{D_{\text{К}}}$; $\bar{f}_{\text{ВХ}} = \frac{4 \cdot a_{\text{ВХ}} h_{\text{ВХ}}}{\pi D_{\text{К}}^2}$; $\bar{w}_\varphi = \frac{w_\varphi}{v_{\text{ВХ}}}$;

$\bar{w}_{\varphi m} = \frac{w_{\varphi m}}{v_{\text{ВХ}}}$; $v_{\text{ВХ}}$ – скорость потока на входе в камеру;

$D_{\text{К}}$ – диаметр камеры.

Методика расчета температурного поля и толщины корочки шлама. Жидкий шлам по каналу 1 (рис. 1а) подается на вращающийся диск 2, получающиеся капли шлама попадают в закрученный поток высокотемпературного газа, до столкновения со стенкой 3 поверхность капли шлама в распылительной камере должна затвердеть, т. е. поверхность капли нагревается до температуры выше температуры фазового перехода воды, например, до 101 °С, и вся влага выходит из слоя. При этом поглощается теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в пар в некотором тем-

пературном диапазоне. Небольшая часть холодного воздуха по каналу 7 идет на охлаждение вращающегося диска 2.

Прогрев капли жидкого шлама радиусом r_0 осуществляется в закрученном потоке высокотемпературного газа с температурой T_Γ и описывается сквозным уравнением теплопроводности с переменными граничными условиями третьего рода, учитывающими теплообмен конвекцией, и тепловым излучением по методике [9]. Решение осуществлялось методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных.

Тестирование численного решения задачи путем оценки погрешности баланса теплоты в теле показало, что $k_y = 6$, $N = 40$ и $\Delta T = 2^\circ\text{C}$, $T_\Phi = 100^\circ\text{C}$.

Методика расчета относительной скорости и траектории движения капли шлама. На жидкую каплю шлама, движущуюся в закрученном высокотемпературном газовом потоке, действуют силы инерции $\vec{F}_и$, силы аэродинамического сопротивления \vec{F}_c и силы тяжести \vec{F}_g . Уравнения движения тела в проекциях на оси цилиндрической системы координат имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dV_r}{dt} &= \frac{V_\Phi^2}{r} + \frac{3}{4} \cdot \frac{C \cdot \rho_\Gamma}{2 \cdot r_0 \cdot \rho_{шл}} (W_r - V_r) \times \\ &\times \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2}; \\ \frac{dV_\Phi}{dt} &= \frac{V_r \cdot V_\Phi}{r} + \frac{3}{4} \cdot \frac{C \cdot \rho_\Gamma}{2 \cdot r_0 \cdot \rho_{шл}} (W_\Phi - V_\Phi) \times \\ &\times \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2}; \\ \frac{dV_z}{dt} &= \frac{3}{4} \cdot \frac{C \cdot \rho_\Gamma}{2 \cdot r_0 \cdot \rho_{шл}} (W_z - V_z) \times \\ &\times \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2} + g_0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Для расчета траектории движения капли шлама система уравнений (1) дополняется кинематическими соотношениями:

$$V_r = \frac{dr}{dt}; \quad V_\Phi = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dt}; \quad V_z = \frac{dz}{dt}. \quad (4)$$

Здесь V_r, V_Φ, V_z – проекции вектора скорости капли шлама на оси r, ϕ, z – цилиндрических координат; W_r, W_Φ, W_z – проекции вектора скорости высокотемпературного газа на оси цилиндрических координат; C – коэффициент аэродинамического сопротивления капли шлама потоку газа; g_0 – ускорение свободного падения; $\rho_{шл}$ – плотность капли шлама; ρ_Γ – плотность высокотемпературного газа.

Относительная скорость капли шлама и газового потока находится по выражению:

$$W_{отн} = \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2}. \quad (5)$$

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений (3) осуществлялось численным методом Рунге – Кутты [10].

Расчет максимального диаметра капли шлама при дисковом распыле. Диаметр образующихся основных капель, исходя из условия равенств, действующих на каплю центробежной силы и силы поверхностного натяжения, выражается зависимостью [11]:

$$d = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{R \cdot \rho_{шл}}}, \quad (6)$$

где c – константа;

R – радиус диска;

σ – коэффициент поверхностного натяжения для жидкого шлама;

ω – угловая скорость вращения диска.

Справедливость соотношения (6) проверена различными исследованиями [11] в диапазоне изменения угловой скорости вращения диска от 30 до 1360 с^{-1} , радиусе диска от 10 до 110 мм, плотности жидкости от 300 до 1360 $\text{кг}/\text{м}^3$, коэффициенте поверхностного натяжения жидкости от 0,031 до 0,456 $\text{Н}/\text{м}$ и диаметре основных капель от 0,03 до 4 мм. В этом диапазоне изменения параметров значение c варьируется от 1,9 до 4,6. Установлено, что c мало зависит от профиля кромки диска.

Расчеты диаметра капель проводились по соотношению (6), изменялась угловая скорость вращения диска, радиус диска, константа c принималась максимальной, коэффициент по-

верхностного натяжения принимался равным $\sigma = 0,023$ [12].

При увеличении радиуса диска от 0,1 до 0,3 м максимальный диаметр капли уменьшается от $6,85 \cdot 10^{-3}$ до $9,9 \cdot 10^{-4}$ м. Угловая скорость вращения диска изменялась от 30 до 120 с^{-1} .

Алгоритм расчета теплообмена капли шлама в закрученном потоке газа. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчета теплообмена капли жидкого шлама в закрученном высокотемпературном потоке газа.

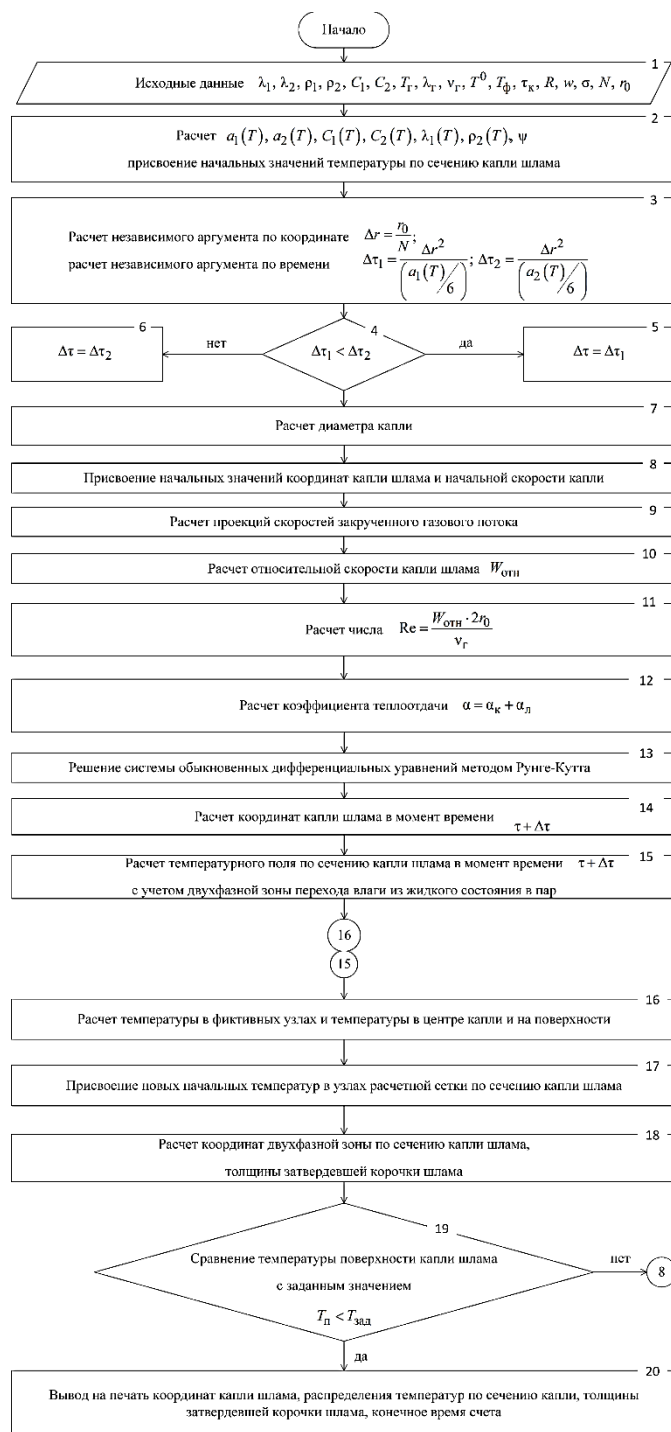


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В блоке № 1 задаются исходные данные.

В блоке № 2 рассчитываются эффективные теплофизические характеристики жидкого шлама и происходит присвоение начальных значений температур по сечению капли.

В блоке № 3 рассчитывается независимый аргумент по координате и по времени.

В блоках № 4, 5, 6 осуществляется выбор наименьшего шага по времени.

В блоке № 7 по выбранному диаметру распылительного диска и угловой скорости вращения диска рассчитывается максимальный диаметр капли жидкого шлама.

В блоке № 8 присваиваются начальные значения координат капли и начальной скорости капли.

В блоке № 9 производится расчет проекций скоростей на оси цилиндрических координат закрученного высокотемпературного газового потока.

В блоке № 10 рассчитывается относительная скорость капли шлама.

В блоке № 11 производится расчет числа Рейнольдса.

В блоке № 12 рассчитывается коэффициент теплоотдачи за счет конвекции и теплового излучения.

В блоке № 13 осуществляется решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты.

В блоке № 14 рассчитываются координаты капли шлама в момент времени $\tau + \Delta\tau$, присвоение начальных значений координат

капли шлама в потоке закрученного высокотемпературного газа.

В блоке № 15 производится расчет температурного поля по сечению капли шлама в момент времени $\tau + \Delta\tau$ с учетом фазового перехода влаги из жидкого агрегатного состояния в пар.

В блоке № 16 осуществляется расчет температур в фиктивных узлах, в центре и на поверхности капли шлама.

В блоке № 17 осуществляется присвоение начальных температур в узлах расчетной сетки по сечению капли шлама.

В блоке № 18 осуществляется расчет координат двухфазной зоны по сечению капли шлама и толщины сухой корочки шлама.

В блоке № 19 производится сравнение температур на поверхности капли шлама с заданными значениями, например, 101 °С [5]. И если температура поверхности достигла заданного значения, в блоке № 20 осуществляется вывод на печать координат капли шлама, распределения значений температур по сечению капли шлама, толщины сухой корочки шлама, конечное время счета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлена взаимосвязь полярных координат капли шлама по радиусу траектории движения в момент высыхания поверхностного слоя капли шлама от диаметра капли.

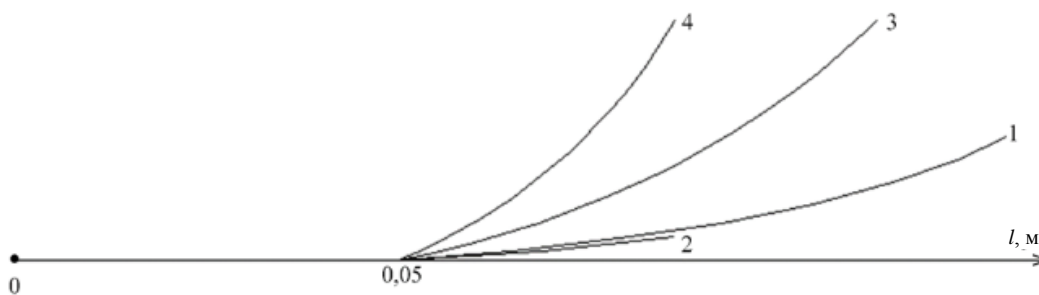


Рис. 3. Проекция траекторий движения частиц шлама на горизонтальную плоскость:
1 – $\omega = 150$, $d = d_{\text{макс}}$; 2 – $\omega = 150$, $d = d_{\text{макс}} / 2$; 3 – $\omega = 30$, $d = d_{\text{макс}}$; 4 – $\omega = 30$, $d = d_{\text{макс}} / 2$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Из рис. 3 видно, что с увеличением диаметра каплей координата по радиусу увеличивается. При этом с увеличением угловой ско-

рости вращения диаметр капли уменьшается и увеличивается скорость отрыва капли от диска. При угловой скорости вращения диска 150 с^{-1}

траектория 1 капли шлама диаметром $d_{\text{макс}}$ больше траектории 2 капли диаметром $d_{\text{макс}}/2$. При угловой скорости вращения в 5 раз меньшей траектория 3 капли диаметром $d_{\text{макс}}$ больше траектории 4 капли диаметром $d_{\text{макс}}/2$ в момент высыхания поверхности капли шлама.

На рис. 4а представлена взаимосвязь диаметра капли шлама и угловой скорости вращения диска для разных диаметров. На рис. 4б

представлена зависимость скорости отрыва капли шлама от угловой скорости вращения диска разного диаметра. Из рис. 4 видно, что с увеличением угловой скорости вращения диска уменьшается диаметр капли (рис. 4а), а с увеличением угловой скорости вращения диска увеличивается скорость отрыва капли от диска (рис. 4б). С увеличением диаметра диска диаметр капель уменьшается, а скорость отрыва капель возрастает (рис. 4).

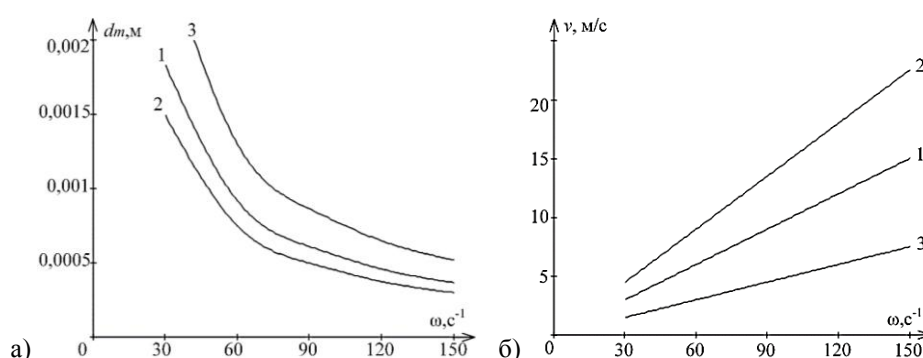


Рис. 4. Взаимосвязь угловой скорости вращения диска, скорости отрыва капель и максимального диаметра капель шлама: 1 – $R_D = 0,1$; 2 – $R_D = 0,15$; 3 – $R_D = 0,05$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 5 представлены поля температур по сечению капли в момент полного высыхания поверхности капли. Из рисунка видно, что с увеличением температуры греющего газа резко увеличивается градиент темпе-

ратуры в поверхностном слое и продолжительность сушки уменьшается в 1,76 раза с $1,70 \cdot 10^{-4}$ с при $T_r = 1\,000$ °С до $9,68 \cdot 10^{-5}$ с при $T_r = 1\,200$ °С.

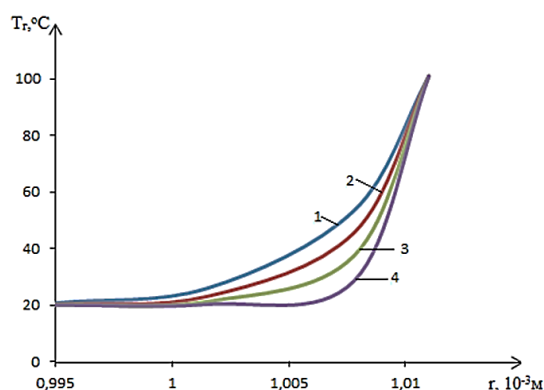


Рис. 5. Температурные поля в капле в момент высыхания поверхностного слоя: 1 – $T_r = 900$ °С; 2 – $T_r = 1\,000$ °С; 3 – $T_r = 1\,100$ °С; 4 – $T_r = 1\,200$ °С

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 6 представлена взаимосвязь траектории движения капли, радиуса и угловой скорости вращения диска в момент высыхания

поверхностного слоя. Из рис. 6 видно, что с увеличением радиуса и угловой скорости вращения распыливающего диска конечные

координаты траектории капли увеличиваются. При угловой скорости вращения диска $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ и увеличении радиуса диска с 0,05 до 0,15 м конечные координаты траектории увеличиваются в 2,98 раза. С увеличением

угловой скорости вращения диска диаметр капли уменьшается, а скорость отрыва капли от диска увеличивается, поэтому конечные координаты капли по радиусу примерно одинаковы.

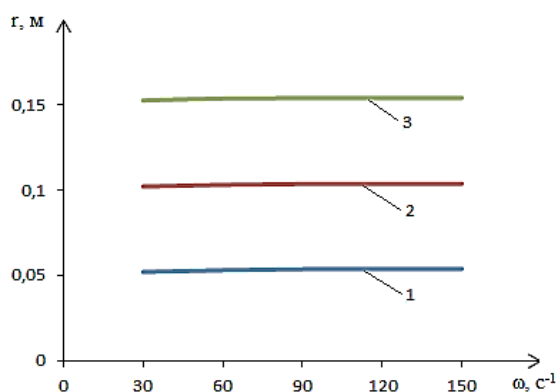


Рис. 6. Взаимосвязь траектории движения капли, радиуса и угловой скорости вращения распылительного диска при температуре греющего газа $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$:

1 – радиус диска 0,05 м; 2 – радиус диска 0,1 м; 3 – радиус диска 0,15 м

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 представлено влияние температуры греющей среды на конечные координаты траектории капли в момент высыхания поверхностного слоя. Из рис. 7 видно, что при увеличении температуры греющей

среды от $1\ 000$ до $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ конечные координаты капли уменьшаются на 1 % при угловой скорости вращения диска равной $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ и радиусе диска $R_D = 0,15\text{ м}$.

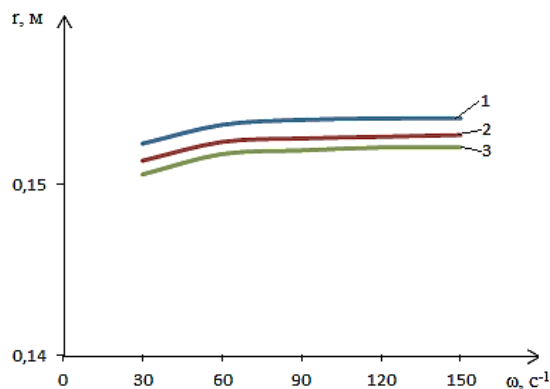


Рис. 7. Влияние температуры греющей среды на траекторию капли:

1 – $T_r = 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_r = 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T_r = 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Анализ полученных данных показывает, что на габаритные размеры камеры распыления оказывают влияние размер распыливающего диска, угловая скорость вращения диска, а также скорость входа газового потока в камеру распыления. Чем больше угловая скорость диска, тем меньше получается макси-

мальный диаметр капли распыла, а скорость отрыва капли от диска увеличивается, конечные координаты траектории капли по радиусу мало изменяются. При этом в 2–3 раза уменьшается время, необходимое для испарения влаги из поверхностного слоя капли шлама. Увеличение размера распыливающего диска

приводит к увеличению начальной скорости капли и уменьшению максимального диаметра капли. Увеличение размера диска с радиуса, равного 0,05 м, до радиуса, равного 0,15 м, (т. е. в три раза) уменьшает максимальный диаметр капель шлама в 2 раза. Скорость отрыва капель увеличивается в 3 раза, что увеличивает соответственно коэффициент теплоотдачи. Таким образом, математическая модель позволяет прогнозировать характерные размеры камеры распыления при проектировании устройства, а именно диаметр камеры и необходимую высоту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования траектории движения жидкой капли шлама, содержащего воду, масло и железную окалину, в закрученном потоке высокотемпературного газа создана математическая модель теплообмена жидкой

капли шлама с учетом фазового перехода воды из жидкого состояния в паровое. Получены траектории капель шлама в закрученном высокотемпературном потоке газа в цилиндрической системе координат, взаимосвязь координат капли шлама в момент высыхания верхнего слоя шлама от диаметра капли, времени, необходимого для высыхания верхнего слоя в зависимости от диаметра капли. Полученные координаты позволяют прогнозировать характерные размеры камеры при проектировании установки распыления и сушки шлама. Предложен алгоритм расчета теплообмена капли шлама в закрученном высокотемпературном потоке газа с учетом двухфазной зоны перехода влаги из жидкого состояния в пар. В дальнейшем предполагается разработка системы управления процессом высокотемпературной сушки капель шлама на промышленном объекте.

Список источников

1. Пантелят Г. С., Никулин С. Е., Царенко А. Н. и др. Опыт эксплуатации систем оборотного водоснабжения непрерывных станов 2000 горячей прокатки // ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 1989. № 12. С. 67–69.
2. Бабошин В. М., Кривцевцов Е. А., Абзалов В. М. и др. Теплофизические свойства топлив и смазочных материалов черной металлургии. М.: Металлургия, 1982. 150 с.
3. Ульянов В. П., Жилина Н. И., Ковтун В. Ф. и др. Безотходная термическая переработка водомаслоокалиносодержащих отходов // Сталь. 1989. № 1. С. 88–92.
4. Галкин Ю. А., Пантелят Г. С., Галый Л. Г. и др. Физико-химические свойства осадков окалинмаслосодержащих сточных вод // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1993. № 2. С. 73–75.
5. Синецын Н. Н., Маклаков А. В., Дмитриева С. Р. Исследование температурного поля плоского слоя замасленной окалины при испарении влаги // Проблемы и перспективы развития науки и образования в XXI веке: материалы Международ. науч.-практич. конф., 25 апреля 2022 г., г. Нефтекамск. Нефтекамск: НИЦ «Мир Науки», 2022. С. 90–94.
6. Харьков В. В., Николаев А. Н. Численное моделирование тепло- и массообмена в процессе концентрирования термолабильных растворов в закрученном потоке // Ползуновский вестник. 2017. № 1. С. 30–34.

References

1. Pantelyat G. S., Nikulin S. E., Tsarenko A. N. et al. Opyt ekspluatatsii sistem oborotnogo vodosnabzheniia nepreryvnykh stanov 2000 goriachei prokatki. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*. 1989;(12):67–69. (In Russian).
2. Baboshin V. M., Krivtsevtsov E. A., Abzalov V. M. et al. Teplofizicheskie svoistva topliv i smazochnykh materialov chernoii metallurgii. Moscow: Metallurgii; 1982. 150 p. (In Russian).
3. Ulyanov V. P., Zhilina N. I., Kovtun V. F. et al. Bezotkhodnaia termicheskaia pererabotka vodomaskalinosoderzhashchikh otkhodov. *Stal*. 1989;(1):88–92. (In Russian).
4. Galkin Yu. A., Pantelyat G. S., Galyi L. G. et al. Fiziko-khimicheskie svoistva osadkov okalinmaslosoderzhashchikh stochnykh vod. *Metallurgical and Mining Industry*. 1993;(2):73–75. (In Russian).
5. Sinitsyn N. N., Maklakov A. V., Dmitrieva S. R. Issledovanie temperaturnogo polia ploskogo sloia zamaslennoi okaliny pri isparenii vlagi. In: *Proceedings of the International Research-to-Practice Conference "Problemy i perspektivy razvitiia nauki i obrazovaniia v XXI veke"*, April 25, 2022, Neftekamsk. Neftekamsk: NITs "Mir Nauki"; 2022. p. 90–94. (In Russian).
6. Kharkov V. V., Nikolaev A. N. Chislennoe modelirovanie teplo- i massoobmena v protsesse kontsentrirovaniia termolabilnykh rastvorov v zakruchennom potoke. *Polzunovskiy vestnik*. 2017;(1):30–34. (In Russian).
7. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Evaporation of water droplets moving through high-temperature gases.

7. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Испарение капель воды при движении через высокотемпературные газы // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 1. С. 104–111.
8. Сабуров Э. Н., Карпов С. В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве. М.: Экология, 1993. 365 с.
9. Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Куценко В. Н. Математическое моделирование и управление термомеханическим разрушением одиночных кусков угля // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1. С. 59–78.
10. Калиткин Н. Н. Численные методы / под ред. А. А. Самарского. М.: Наука, 1978. 512 с.
11. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
12. Никольский Б. П., Григорьев О. Н., Позин М. Е. Справочник химика. Т. 1. Химия. М.; Л., 1966. 1071 с.
- Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2018;91(1):104–111. (In Russian).
8. Saburov E. N., Karpov S. V. Tsiklonnye ustroistva v derevoobrabatyvaiushchem i tselliulozno-bumazhnom proizvodstve. Moscow: Ekologiya; 1993. 365 p. (In Russian).
9. Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Kutsenko V. N. Mathematical modeling and controlling thermomechanical destruction of single pieces of coal. *Cherepovets State University Bulletin*. 2023;(1):59–78. (In Russian).
10. Kalitkin N. N. Chislennyye metody. Samarsky A. A., editor. Moscow: Nauka; 1978. 512 p. (In Russian).
11. Pazhi D. G., Galustov V. S. Osnovy tekhniki raspylivaniia zhidkostei. Moscow: Khimiia; 1984. 256 p. (In Russian).
12. Nikolsky B. P., Grigoryev O. N., Pozin M. E. Spravochnik khimika. Vol. 1. Khimiia. Moscow; Leningrad; 1966. 1071 p. (In Russian).

Информация об авторах

Н. Н. Синицын – доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования.

Н. В. Запатрина – кандидат технических наук, доцент.

И. А. Сарычева – кандидат технических наук.

Ю. В. Грибкова – кандидат технических наук.

Е. В. Голицына – кандидат технических наук, доцент.

Ю. В. Донцова – аспирант.

Information about the authors

N. N. Sinitsyn – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Honored Worker of Higher Education.

N. V. Zapatrina – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

I. A. Sarycheva – Candidate of Sciences (Engineering).

Yu. V. Gribkova – Candidate of Sciences (Engineering).

E. V. Golitsyna – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Yu. V. Dontsova – Postgraduate.