

УДК 66.021.4.

Моделирование прогрева капли масла при неустановившемся движении в камере распыления

Н.Н. Синицын^{1,2}, Н.В. Телин¹, А.С. Андреев¹, Т.А. Шипунова¹

¹ Череповецкий государственный университет, г. Череповец, 162600, Россия

² Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова училище радиоэлектроники, г. Череповец, 162622, Россия

e-mail: Lampo4ka84@mail.ru, nnsinitcyn@chsu.ru, telin_nv@mail.ru, asandreev@chsu.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-5-233-239

Поступила в редакцию 25.01.2020

После доработки 12.05.2020

Принята к публикации 13.05.2020

Приведено математическое описание процесса прогрева капли масла при неустановившемся движении в распылительной камере по прямоточной схеме. Представлено численное моделирование процесса прогрева капли масла. Предложены зависимости для расчета времени полного прогрева капли масла и зависимости для определения координат траектории движения капли в момент полного прогрева.

Ключевые слова: камера распыления, капля масла, уравнение движения, уравнение теплопроводности, градиент температуры, неустановившееся движение, траектория.

Введение

На предприятиях образуется большой объем отработанных масел, содержащих мелкодисперсные твердые загрязнения. Степень утилизации таких отходов не превышает 75% [1]. На практике для выделения масел применяются традиционные механические методы, позволяющие извлечь масло лишь частично до определенного значения концентрации с потерей неизвлеченных масел.

Актуальной задачей является разработка безотходной технологии полного разделения компонентов отработанного масла (масла и твердых загрязнений), основанной на применении простой перегонки отработанного масла в распылительной камере. Для этого необходимо быстро нагреть материал до максимальной температуры. Длительность неустановившегося движения капель распыла составляет незначительную долю при распылении механическими форсунками по сравнению с общей длительностью падения в распылительной камере. Весь процесс разделения протекает в основном пе-

риоде установившегося движения частиц. В камере распыления применяется тонкий распыл, размеры частиц составляют 20–100 мкм. Теплообмен капель жидкости с газовым потоком рассмотрен в [2–14]. Прогрев и испарение капель в газовом потоке представлен в [15, 16]. Движение капель в потоке исследовано в [17, 18].

Динамику движения частиц распыленного отработанного масла можно представить в следующем виде. При выходе из механической форсунки частицы распыленной жидкости обладают сравнительно большой скоростью. Взаимодействие между газовой средой и частицей, находящейся в состоянии относительного движения, проявляется в возникновении особого рода сил, приложенных к поверхностям раздела, – сил сопротивления. Эти силы обуславливаются вязкостью газовой среды. Под действием сил сопротивления частицы будут двигаться с постоянно уменьшающимся ускорением, т.е. скорость частицы будет уменьшаться. В некоторый момент времени ускорение частиц относительно газовой среды становится равным ну-

лю, и они движутся дальше с постоянной скоростью относительно газового потока. Момент равновесного движения частиц наступает, когда силы тяжести частиц уравниваются силой сопротивления. Следовательно, по характеру движения частиц распыленной жидкости весь процесс в разделительной камере можно разделить на две фазы: в первой фазе прогрев происходит при переменной скорости движения частиц; во второй фазе – при постоянной установившейся скорости. Интенсификация теплообмена в распылительной камере достигается путем увеличения относительной скорости в потоке за счет создания условий неустановившихся их движений. Оценка траектории и скорости движения частиц необходимы при расчетах прогрева частиц, оптимизации аэродинамической камеры распыления с целью исключения попадания частиц на стенки и дно камеры.

Целью представленной работы является исследование температурного поля частицы масла при ее движении с переменной скоростью в потоке перегретого водяного пара.

Объекты и методы исследования

Прогрев частицы, содержащей масло и твердые загрязнения, рассматривается в распылительной камере при прямоточной схеме движе-

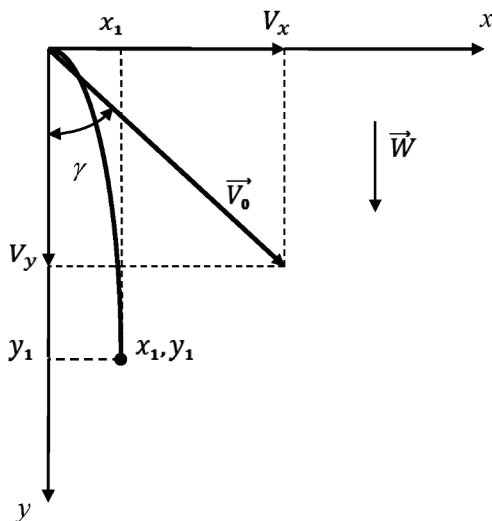


Рис. 1. Схема расчета траектории движения каплей масла в распылительной камере. \vec{W}, \vec{V}_0 – векторы скоростей газа и капли масла; γ – угол вылета капли; V_x, V_y – проекции вектора скорости капли на оси координат; x_1, y_1 – координаты конечной точки проекции

ния газа и материала (рис. 1). На рисунке представлена схема расчета траектории движения капли масла в распылительной камере в начальный момент времени. Ось Oy направлена вдоль канала вертикально. Ось Ox направлена поперек канала – горизонтально. При расчете диапазон начальных скоростей частиц и газа задается исходя из условия диспергирования материала и расхода газа через камеру распыления.

Результатом расчета по траектории движения модели является совокупность данных, которые затем могут быть использованы для построения траекторий движения капель масла при их прогреве в потоке перегретого водяного пара при неустановившемся движении по прямоточной схеме в распылительной камере.

Движение нагреваемой одиночной капли масла в газовом потоке описывается уравнением [19]

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = \sum_{i=1}^k \vec{P}_i. \tag{1}$$

Выражение (1) учитывает массу частицы m , движущейся со скоростью \vec{V} и суммарное воздействие всех сил \vec{P}_i .

Совокупность сил, действующих на частицу, движущуюся в потоке, ограничена главными силами: лобового сопротивления частицы потоку газа и весом. Сила лобового сопротивления может быть представлена в виде:

$$\vec{P}_c = \frac{1}{2} \cdot c \cdot f \cdot \rho_\Gamma \cdot (\vec{W} - \vec{V}) \cdot |\vec{W} - \vec{V}|,$$

а вес: $\vec{P}_e = \vec{g} \cdot m$, где $m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_\mu$; $f = \pi \cdot r_0^2$ – площадь миделева сечения частицы для шара; \vec{W} – вектор скорости потока газа; ρ_Γ и ρ_μ – плотности частицы и газового потока; \vec{g} – ускорение свободного падения; c – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, зависящий от критерия $Re = W_{отн.} \cdot \frac{d_\mu}{\nu_\Gamma}$; $W_{отн.}$ – относительная скорость частицы; d_μ – диаметр частицы; ν_Γ – коэффициент кинематической вязкости газового потока. При обтекании сферического тела потоками газа в области $Re < 1$ коэффициент аэродинамического сопротивления частицы $c = \frac{24}{Re}$. В переходной области при

$1 \leq Re \leq 10^3$ $c = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$. В автомоделной области при $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$ $c = 0.48$. В закри- тической области при $Re > 2 \cdot 10^6$ $c = 0.2$.

Представим уравнение движения (1) в про- екции на оси координат, ось Ox направлена перпендикулярно потоку газа, ось Oy – парал- лельно потоку газа:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV_x}{dt} &= \frac{c \cdot f \cdot \rho_{\Gamma}}{2} \cdot (W_x - V_x) \cdot W_{отн.}; \\ m \frac{dV_y}{dt} &= \frac{c \cdot f \cdot \rho_{\Gamma}}{2} \cdot (W_y - V_y) \cdot W_{отн.} + m \cdot g; \\ m \frac{dV_z}{dt} &= \frac{c \cdot f \cdot \rho_{\Gamma}}{2} \cdot (W_z - V_z) \cdot W_{отн.} \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь τ – время.

$$W_{отн.} = \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2}.$$

Прогрев капли масла сферической формы радиусом r_0 осуществляется в потоке газа с температурой T_c . В начальный момент времени при $\tau = 0$ во всех точках капли одинаковая температура T_0 . Капля после попадания в газо- вый поток начинает прогреваться за счет лучис- того и конвективного теплообмена. Этот про- цесс происходит в условиях неоднородного по- ля температур по сечению капли. Поэтому про- грев капли масла описывается нестационарным уравнением теплопроводности с коэффициен- тами температуропроводности, зависящими от температуры, и переменными граничными условиями:

$$\begin{aligned} c(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} &= \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{2 \cdot \lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r}; \end{aligned} (3)$$

при $0 < r < r_0$, $0 < \tau \leq \tau_k$,

где $T(r, \tau)$ – текущая температура; r – текущая координата; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопро- водности капли; $c(T)$ – удельная теплоемкость капли; $\rho(T)$ – плотность капли.

Начальные условия: $T(r, 0) = T_0$.

В качестве граничных условий принимаем условия, учитывающие лучистый и конвектив- ный теплообмен капли с потоком газа.

При $r = r_0$:

$$\begin{aligned} \lambda(T) \frac{\partial T(r_0, \tau)}{\partial r} &= \alpha_k [T_{\Gamma} - T(r_0, \tau)] + \\ &+ \frac{\varepsilon_M}{1 - (1 - \varepsilon_M) \cdot (1 - A_{\Gamma})} \times \\ &\times \sigma_0 \cdot [\varepsilon_{\Gamma} \cdot (T_{\Gamma} + 273)^4 - A_{\Gamma} \cdot (T_M + 273)^4]. \end{aligned} (4)$$

При $r = 0$:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, (5)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекци- ей, определяемый по формуле [20]:

$$\overline{Nu} = 2 + 0.03 \cdot Re^{0.54} \cdot Pr^{0.33} + 0.35 \cdot Re^{0.58} \cdot Pr^{0.36};$$

$\overline{Nu} = \frac{2 \cdot d_{\text{ч}}}{\lambda_{\Gamma}}$; Re – число Рейнольдса, Pr – число

Прандтля, λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности газа, T_{Γ} – температура газового потока, обтека- ющего каплю; $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – по- стоянная Стефана–Больцмана; ε_{Γ} – степень черноты водяного пара; ε_M – степень черноты масла; $T(r_0, \tau)$ – температура поверхности кап- ли; A_{Γ} – поглощательная способность газа по отношению к излучению, характеризующая тем- пературой капли масла.

$$\varepsilon_{\Gamma} = f(p^{l_{\text{эф.}}}, T),$$

где p – давление в камере; $l_{\text{эф.}}$ – эффективная толщина излучающего слоя; $l_{\text{эф.}} = 3.6 \cdot \frac{V_k}{F_{\text{ст.}}}$, где

V_k и $F_{\text{ст.}}$ – объем и поверхность стенок камеры.

При решении системы уравнений (2) применя- ется метод Рунге–Кутты четвертого порядка [21]. Для оценки шага по времени использовался экстраполяционный переход пределу. Шаг по времени $\Delta \tau = 0.00001$ с. Расчет координат траектории движения капли масла за рассчи- тываемый шаг $\Delta \tau$ по времени проводится по формулам:

$$X(\tau + \Delta \tau) = X(\tau) + V_x \Delta \tau;$$

$$Y(\tau + \Delta \tau) = Y(\tau) + V_y \Delta \tau;$$

$$Z(\tau + \Delta \tau) = Z(\tau) + V_z \Delta \tau.$$

Здесь $V_x \cdot \Delta \tau$ – приращение координаты по оси Ox ; $V_y \cdot \Delta \tau$ – приращение координаты по оси Oy ; $V_z \cdot \Delta \tau$ – приращение координаты по оси Oz ; $X(\tau), Y(\tau), Z(\tau)$ – значения координат в момент времени τ ; $X(\tau + \Delta \tau)$, значения коор- динат в момент времени $\tau + \Delta \tau$.

Система уравнений (3)–(5) решена методом конечных разностей по неявной схеме аппроксимации производных. Результаты численного решения для капли при постоянных граничных условиях сравниваются с существующим точным аналитическим решением. Выбор теста проводится по значению критерия Bi_M , которое рассчитывается с использованием исходных данных:

$$Bi_M = \alpha_{\max} \cdot r_{\max} / \lambda_{\min},$$

где α_{\max} , r_{\max} – максимальные значения коэффициента теплоотдачи и радиуса капли; λ_{\min} – минимальное значение коэффициента теплопроводности. В качестве теста выбираем точное решение при $Bi > Bi_M$. При расчете было принято: $Bi = 3.0$; $T_r = 673$ К; $T_0 = 293$ К; температура в центре капли – 623 К. Оптимальное количество узлов расчетной сетки $N = 160$, шаг по времени $\Delta t = 0.00001$ с.

Результаты расчета температурных полей капли масла при движении в неустановившемся режиме

Математическое моделирование прогрева одиночной капли масла, находящейся в потоке газа по модели (2)–(5), происходит с учетом градиента температур по сечению капли масла. На рис. 2 представлено изменение температуры прогреваемого материала в течение времени до момента исчезновения разности температур по сечению капли масла. При этом изменяется относительная скорость капли масла.

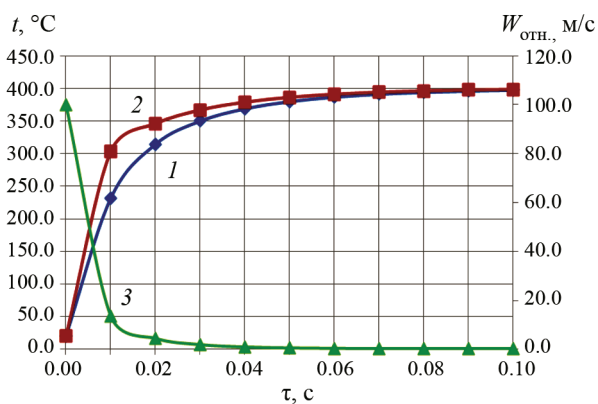


Рис. 2. Изменение температуры материала и относительной скорости движения капли диаметром $80 \cdot 10^{-6}$ м: 1 – температура в центре; 2 – температура на поверхности; 3 – относительная скорость движения капли масла

Длительность прогрева капли составляет 0.109 с. Тепловой критерий Bi равен 2.062. Число Рейнольдса $Re = 132$. Максимальное отклонение от вертикальной оси составляет 0.516 м, отклонение от горизонтальной оси равно 0.0341 м при угле вылета $\gamma = \pi/2$, где γ – угол вылета, измеряемый от вертикальной оси. Относительная скорость капли изменяется от 100.0 до 0.155 м/с.

Математическая модель прогрева одиночной капли масла до момента исчезновения градиента температуры позволяет определить траекторию капли в процессе неустановившегося движения. Анализ траекторий движения капель позволил получить зависимости продолжительности прогрева капли до полного ее прогрева и координаты точек траекторий движения в момент исчезновения градиента температур по сечению капли. При этом варьировались диаметры, начальная скорость, угол вылета и относительная скорость капли, скорость газа.

Результаты и их обсуждение

При обработке полученных с использованием математической модели данных определены зависимости для расчета продолжительности полного прогрева капли масла при ее движении в неустановившемся режиме:

$$Fo = 8.722 \cdot Re^{-0.1469} \cdot \left(\frac{T_r}{T_0} \right)^{0.213},$$

где $Fo = \frac{a \cdot \tau}{r_0^2}$ – критерий Фурье, a – коэффициент температуропроводности; τ – время;

$Re = \frac{W_{отн.} \cdot d_{ч}}{\nu_r}$ – число Рейнольдса; $W_{отн.}$ – относительная скорость капли; $d_{ч}$ – диаметр; ν_r – коэффициент кинематической вязкости газа;

T_r – температура газа; T_0 – начальная температура масла. Радиус капли изменялся от $10 \cdot 10^{-6}$ до $75 \cdot 10^{-6}$ м, температура перегретого газа – 673 К, температура материала капли изменялась от 293 до 473 К. Относительная погрешность не превышает 4.04%.

В исследованном диапазоне скоростей капли и газового потока получены координаты точек траектории, соответствующих полному прогреву капли при неустановившемся движении в распылительной камере с учетом угла вылета капли в газовый поток:

$$x_1 = 3.98 \cdot 10^{-2} \left[V_0 \cdot \sin \gamma \cdot Fo \cdot \frac{r_0^2}{\alpha} \right] + 0.0359;$$

относительная погрешность не превышает 4.1%.

$$y_1 = 4.61 \cdot 10^{-2} \left[V_0 \cdot \cos \gamma \cdot Fo \cdot \frac{r_0^2}{\alpha} \right] + 2.93 \cdot 10^{-2};$$

относительная погрешность не превышает 2.76%,

где $\frac{\pi}{6} \leq \gamma \leq \frac{\pi}{3}$.

При движении капли вертикально вниз длина траектории капли:

$$y_1 = 6.375 \cdot 10^{-2} \left[V_0 \cdot Fo \cdot \frac{r_0^2}{\alpha} \right]^{0.9};$$

относительная погрешность не превышает 2.01%.

При движении капли поперек потока:

$$x_1 = 7.15 \cdot 10^{-2} \left[V_0 \cdot Fo \cdot \frac{r_0^2}{\alpha} \right]^{0.832};$$

относительная погрешность не превышает 2.6%.

Заключение

Для исследования траекторий движения капли масла в потоке перегретого водяного пара создана математическая модель, включающая уравнение движения тела, уравнение теплопроводности для расчета температурного поля капли до ее полного прогрева. В результате моделирования прогрева капли масла при неустановившемся ее движении в потоке перегретого водяного пара получены зависимости для оценки координат каплей в точках их полного прогрева, а также математическая зависимость для оценки продолжительности полного прогрева капли.

Результаты моделирования применимы при конструировании распылительных камер с использованием механической форсунки или центробежного диска для распыления жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уткин Ю.В. Вторичные ресурсы – важный резерв черной металлургии // *Сталь*. 1994. № 3. С. 1–6.
2. Высокоморная О.В., Захаревич А.В., Стрижак П.А. Экспериментальная оценка изменения размеров и скоростей движения капель при их перемещении в области высокотемпературных продуктов сгорания // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 5. С. 214–220.
3. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные продукты сгорания // *Тепловые процессы в технике*. 2013. Т. 5. № 6. С. 254–261.
4. Kharkov V.V. Mathematical modeling of thermolabile solutions concentration in vortex chamber // *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2018. V. 980. P. 012006.
5. 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.
6. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Особенности перемещения и испарения капель воды в контактных водонагревателях // *Теплоэнергетика*. 2016. № 9. С. 68–75.
7. Тищенко В.А., Алексеев Р.А., Гаврилов И.Ю. Модель движения эрозивно-опасных капель в межлопаточных каналах паровых турбин // *Теплоэнергетика*. 2018. № 12. С. 35–44.
8. Акулич П.В. Моделирование тепломассообмена капель при сушке перегретой жидкости в условиях комбинированного энерговоздействия // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 2. С. 404–413.
9. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Накоряков В.Е., Стрижак П.А. Экспериментальная оценка скоростей испарения капель воды в высокотемпературных газах // *Прикладная механика и техническая физика*. 2017. Т. 58. № 5 (345). С. 151–157.
10. Дмитриев А.В., Круглов Л.В., Дмитриева О.С. Определение средних коэффициентов теплоотдачи последовательно падающих капель в потоке газа // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 5. С. 27–29.
11. Стрижак П.А., Волков Р.С., Забелин М.В., Курисько А.С. Особенности испарения одиночных и полидисперсного потока капель воды в высокотемпературной газовой среде // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9 (часть 2). С. 307–311.
12. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение капель воды при движении через высокотемпературные газы // *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91. № 1. С. 104–111.
13. Гириин А.Г. О закономерностях дробления капли в скоростном потоке // *Инженерно-физический журнал*. 2011. Т. 84. № 5. С. 938–943.
14. Волков Р.С., Забелин М.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние размеров и скоростей ввода капель воды в зону горения на эффективность ее использования при тушении пожаров в помещении // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 4. С. 157–163.
15. Кулик М.И. Прогрев и испарение капель жидкого топлива в потоке нагретого воздуха // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2007. № 38. С. 171–175.
16. Келбалиев Г.И. Массообмен между каплями или газовым пузырем и изотропным турбулентным потоком // *Теоретические основы химических технологий*. 2012. Т. 46. № 5. С. 554.
17. Архипов В.А., Ткаченко А.С., Усанина А.С. Численное исследование движения капли в потоке вращающейся вязкой жидкости // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86. № 3. С. 534–541.
18. Москалев Л.Н., Халиков Л.Н. Численное решение математической модели движения капель в спутном вращающемся потоке газа // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18. № 2. С. 371–373.
19. Синицын Н.Н., Полеводова Л.А. Расчет траекторий движения капли воды с учетом фазовых переходов в

системе газоочистки кислородного конвертера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 6. С. 160–164.

20. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент:

Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.

21. Калиткин Н.Н. Численные методы: учебное пособие для вузов / Под ред. А.А. Самарского. М.: Наука, 1978. 512 с.

An oil drop heating modelling at unstable motion in the spray chamber

N.N. Sinitsyn^{1,2}, N.V. Telin¹, A.S. Andreev¹, T.A. Shipunova¹

¹ Cherepovets State University, Cherepovets, 162600, Russia.

² Cherepovets Higher Military Engineering Order of Zhukov School of Radio Electronics, Cherepovets, 162622, Russia

The article presents mathematical description of the drop of oil heating process at the unsteady motion in the spray chamber according to the straight-through arrangement. A numerical modelling of the drop of oil heating process is presented. A mathematical description of the process of heating a drop of oil with unsteady movement in the spray chamber according to the direct-flow circuit is given. A numerical simulation of the process of heating an oil drop is presented. Dependencies for computing the time of an oil drop complete heating, and dependences for determining the coordinates of the droplet trajectory at the moment of its complete heating are proposed.

Keywords: spray chamber, drop of oil, equation of motion, thermal conductivity equation, temperature gradient, unstable motion, trajectory.

REFERENCES

1. Utkin Yu.V. Vtorichnyye resursy – vazhnyiy rezerv chernoy metallurgii [Secondary resources – an important reserve of ferrous metallurgy]. *Stal'– Steel*, 1994, no. 3, pp. 1–6. In Russ.
2. Vysokomornaya O.V., Zakharevich A.V., Strizhak P.A. Eksperimentalnaya otsenka izmeneniya razmerov i skorostey dvizheniya kapel pri ikh peremeshchenii v oblasti vysokotemperaturnykh produktov sgoraniya [Experimental evaluation of variation of sizes and velocities of droplets during moving through high temperature combustion products]. *Teplovyye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 214–220. In Russ.
3. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Vliyaniye formy kapli vody na rezultaty matematicheskogo modelirovaniya eye ispareniya pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Influence of configuration of water drop on results of mathematical simulation of its evaporation at moving through high-temperature combustion products]. *Teplovyye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 254–261. In Russ.
4. Kharkov V.V. Mathematical modeling of thermolabile solutions concentration in vortex chamber. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, 2018, vol. 980, p. 012006.
5. Kharkov V.V., Nikilaev A.N. Chislennoye modelirovaniye teplo- i massoobmena v protsesse kontsentrirvaniya termolabilnykh rastvorov v zakruchennom potoke [Numerical simulation of heat and mass transfer in the process of concentration of thermolabile solutions in a swirling flow]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovskiy Vestnik*, 2017, no. 1, pp. 30–34. In Russ.
6. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Movement and evaporation of water droplets under conditions typical for heat-exchange chambers of contact water heaters. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 9, pp. 666–673. DOI: 10.1134/S004060151609007X
7. Tishchenko V.A., Alekseev R.A., Gavrilov I.Y. A model of the motion of erosion-hazardous droplets in steam turbines' interblade channels. *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, no. 12, pp. 885–892. DOI: 10.1134/S0040601518120108
8. Akulich P.V. Simulation of heat and mass transfer of droplets in drying an overheated liquid under conditions of combined energy effect. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 2, pp. 389–397.
9. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Nakoryakov V.E. Experimental estimation of evaporation rates of water droplets in high-temperature gases. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 889–894.
10. Dmitriyev A.V., Kruglov L.V., Dmitriyeva O.S. Opre-deleniye srednikh koeffitsiyentov teplootdachi posledovatel-no padayushchikh kapel v potoke gaza [Determination of average heat transfer coefficients of successively falling drops in a gas stream]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*, 2017, vol. 20, no. 5, pp. 27–29. In Russ.
11. Strizhak P.A., Volkov R.S., Zabelin M.V., Kurisko A.S. Osobennosti ispareniya odinichnykh i polidispersnogo potoka kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Features of single and polydisperse flow water droplets evaporation in high temperature gas area]. *Fundamentalnyye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 9-2, pp. 307–311. In Russ.
12. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaporation of water droplets moving through high-temperature gases. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no.1, pp. 97–103. DOI: 10.1007/s10891-018-1723-1

13. **Girin A.G.** Laws governing the fragmentation of a droplet in a high-speed stream. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, vol. 84, no. 5, pp. 1009–1015. DOI: 10.1007/s10891-011-0561-1
14. **Volkov R.S., Zabelin M.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.** Vliyaniye razmerov i skorostey vvoda kapel vody v zonu goreniya na effektivnost eye ispolzovaniya pri tushenii pozharov v pomeshchenii [Influence of sizes and input speeds of water droplets in a combustion zone on efficiency of its use at fire suppression in enclosures]. *Teplovyye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 157–163. In Russ.
15. **Koulik M.I.** Progreiv i ispareniiye kapel zhidkogo topliva v potoke nagretogo vozdukh [Heating and evaporation of oil fuel droplets in hot air]. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2007, no. 38, pp. 171–175. In Russ.
16. **Kelbaliev G.I.** Mass transfer between a drop or gas bubble and an isotropic turbulent flow. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2012, vol. 46, no. 5, pp. 477–485.
17. **Arkhipov V.A., Tkachenko A.S., Usanina A.S.** Numerical investigation of droplet motion in rotating viscous liquid flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 3, pp. 534–541.
18. **Moskalev L.N.** Chislennoye resheniye matematicheskoy modeli dvizheniya kapel v sputnom vrashchayushchemsya potoke gaza [Numerical solution of the mathematical model of droplet motion in a spiraling rotating gas stream]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 371–373. In Russ.
19. **Polevodova L.A., Sinitsyn N.N.** Raschet trayektoriy dvizheniya kapli vody s uchetom fazovykh perekhodov v sisteme gazoochistki kislorodnogo konvertera [Calculation on a motion path of a drop of water in gas cleaning system of basic oxygen converter, with phase transfers accounted]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2007, vol. 3, no. 6, pp. 160–164. In Russ.
20. **Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskiiy eksperiment: Spravochnik.** Red. V.A. Grigoryeva, V.M. Zorina [Heat and mass transfer. Thermal Engineering Experiment: Handbook. Red. V.A. Grigoryeva, V.M. Zorina]. Moscow: Energoizdat, 1982. 512 p. In Russ.
21. **Kalitkin N.N.** *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1978. 512 p. In Russ.