

УДК 621.762

А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ
ЧАСТИЦ РАСПЫЛЕННОГО МЕТАЛЛА
В ГАЗОВОЙ СМЕСИ ГЕЛИЯ И АРГОНА**

A.I. Rudskoi, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopayev

**COOLING'S PROCESS MODELING
OF PARTICLES OF ATOMIZED METAL
IN GAS MIXTURE OF HELIUM AND ARGON**

Рассмотрен вопрос построения термоаэродинамической математической модели процесса получения гранул методом PREP. Выполнено моделирование процесса охлаждения частицы в газовой смеси гелия и аргона с учетом тепловых и гидродинамических явлений. Получены временные зависимости силы сопротивления и коэффициента теплоотдачи во время полета частицы. Выполнен расчет влияния смеси охлаждающих газов (90 % гелия и 10 % аргона по массе) на процесс охлаждения частицы титанового сплава ВТ6 с учетом фазового перехода частицы из жидкого состояния в твердое. Показано, что при моделировании процесса получения гранул тугоплавких металлов необходимо отдельно выделять стадию кристаллизации.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГРАНУЛЫ; МЕТОД PREP; АЭРОДИНАМИКА; ТЕПЛО-МАССОПЕРЕНОС; ГАЗОВАЯ СРЕДА.

In the present article it is considered the question of thermo-aerodynamic mathematical model construction of granules obtaining process by method PREP. It is conducted cooling process modeling of the particle in gas mixture of helium and argon with the account of the thermal and hydrodynamic phenomena. Time dependences of resistance force and heat-transfer factor during the particle motion are received. We have calculated the influence of cooling gases mix (90% of helium and 10% of argon on weight) on the process of VT6 titanic alloy particle cooling, taking into account phase transition of the particle from a liquid state to the firm one. It is shown that when modeling process of receiving granules of refractory metals it is necessary to allocate a crystallization stage separately.

MATHEMATICAL MODELING; GRANULES; METHOD PREP; AERODYNAMICS; HEAT-MASS TRANSFER; GAS ENVIRONMENT.

Наиболее эффективный способ повышения качества деталей, в том числе ответственного назначения, — разработка новых эффективных технологий их изготовления. В этом отношении технологии получения порошковых и композиционных материалов и изделий — в настоящее время одни из наиболее перспективных [1–4]. Важное значение для них имеет использование

лазерных технологий обработки материалов [5–7]. Одна из новых технологий — это синтез изделий с помощью электронного луча (СИЭЛ); в ее основу положена операция последовательного наплавления слоев из порошка различных сплавов [8–10].

Для разработки новых материалов, послойного синтеза изделий с помощью лазерного или

электронного луча, нанесения защитных покрытий необходима технология, обеспечивающая получение сферических гранул химически активных металлов (титан, цирконий, ниобий, молибден, тантал, сплавы на их основе, интерметаллиды). Среди различных методов получения гранул в России наиболее широкое распространение получил метод вращающегося электрода с плазменным нагревом (метод PREP) [11].

Для определения технологических режимов распыления и кристаллизации жидких частиц в процессе полета необходимо разработать ряд математических моделей (ММ) процесса распыления, которые представлены на рис. 1. Пунктирными линиями на рисунке показана взаимосвязь моделей, отражающая распределение потоков информации между ними.

Важнейшая составляющая исследования процесса получения гранул методом PREP связана с разработкой аэротермодинамической ММ. Задача моделирования — получить зависимости аэродинамических параметров (скорость, время полета частицы, сила сопротивления) от параметров тепло- и массопереноса (конвективный и радиационный теплообмен, температурное поле частицы и среды и др). Среди исследований, посвященных данному вопросу в области гранул жаропрочных никелевых сплавов, особо следует отметить работы

В.К. Орлова [12, 13]. Расчет процесса охлаждения частицы распыленного металла в газовой среде требует учета тепловых и гидродинамических явлений. Поставленная задача — нелинейная, требующая применения численных методов.

Цель работы — построение аэротермодинамической математической модели процесса охлаждения частицы в смеси инертных газов (гелия и аргона).

Методика моделирования и характерные особенности модели

К отличительным особенностям рассматриваемой математической модели следует отнести: состав газовой смеси (90 % гелия и 10 % аргона по массе);

учет взаимосвязи между механической и тепловой составляющими (коэффициент аэродинамического сопротивления зависит от температуры, а коэффициент теплоотдачи — от скорости полета частицы);

стабилизацию потока перед началом нестационарного расчета;

большое количество расчетных точек теплоемкости материала частицы при температурах фазового перехода.

Теплообмен между поверхностью частицы и газом осуществляется путем конвекции, теплопроводности и лучистого переноса, т. е.



Рис. 1. Моделирование процесса получения гранул методом PREP

является сложным. Частица сферической формы, обладающая высокой начальной скоростью (до 100 метров в секунду), движется в газовой среде.

Структура частицы во многом зависит от скорости зарождения центров кристаллизации и линейной скорости роста кристаллов, которые определяются скоростью отвода тепла V_q от единицы массы металла, равной скорости уменьшения его удельной энтальпии [13].

Разрабатываемая модель является физико-математическим представлением исследуемого процесса охлаждения частицы, она основана на численном решении системы дифференциальных уравнений [14] — теплопередачи, энергии, гидродинамики (уравнение Навье — Стокса), непрерывности.

Построение математической модели процесса

Сложность задачи определяется главным образом не столько нелинейной зависимостью теплофизических свойств газовой среды и материала частицы от температуры, сколько необходимостью совместного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих аэродинамические и термодинамические процессы. Действительно, тепловое воздействие частицы на газовую среду определяет ее термодинамическое состояние, которое, в свою очередь, влияет на механическое (сопротивление среды полету), а скорость полета частицы — на тепловое (конвективное) взаимодействие (рис. 2). Предположение о возможности моделирования процесса охлаждения частицы в газовой среде с постоянным коэффициентом аэродинамического сопротивления приводит к погрешности в расчетах. Для повышения точности расчета следует учитывать зависимость

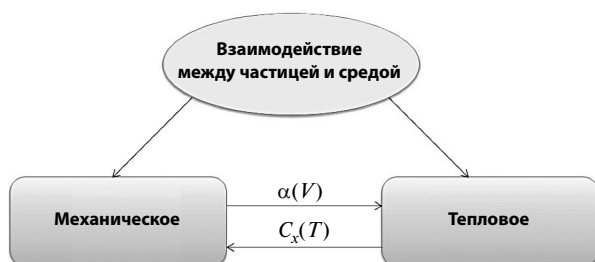


Рис. 2. Моделирование процесса охлаждения частицы распыленного металла в газовой среде с учетом тепловых и аэродинамических явлений

коэффициента аэродинамического сопротивления C_x от скорости полета частицы и температуры, зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости полета частицы V_q .

Средний по поверхности коэффициент α теплоотдачи от шара, обтекаемого потоком теплоносителя, можно рассчитать по формуле [15]

$$Nu = 2 + 0,03Re^{0,54}Pr^{0,33} + 0,35Re^{0,58}Pr^{0,36}, \quad (1)$$

где Nu — число Нуссельта; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

Число Рейнольдса рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$Re = \frac{\rho_g V_q l}{\mu} = \frac{V d_q}{\nu}, \quad (2)$$

где ρ_g — плотность газовой среды; V_q — скорость движение частицы; l — характерный линейный размер (принимается диаметр частицы d_q); μ — коэффициент динамической вязкости; ν — коэффициент кинематической вязкости.

Число Нуссельта, определяющее интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью частицы и потоком газа, можно представить в следующем виде [16]:

$$Nu = \alpha l / \lambda, \quad (3)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; λ — коэффициент теплопроводности.

Формулы для расчета числа Прандтля имеют следующий вид:

$$Pr = \nu / a, \quad (4)$$

где a — коэффициент температуропроводности.

На частицу в полете действует сила аэродинамического сопротивления, направленная в сторону противоположную скорости движения, сила тяжести и сила Архимеда, которой можно пренебречь. Силу аэродинамического сопротивления всегда можно представить в следующем виде [12]:

$$F_x = C_x S_{сеч} V_q^2 \rho / 2, \quad (5)$$

где C_x — коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса; ρ_g — плотность газовой среды; V_q — скорость полета частицы; $S_{сеч}$ — площадь миделевого (среднего) сечения.

Полет частиц в газовой среде происходит не в ламинарном или турбулентном режимах, а в переходной области, которая характеризуется диапазоном изменения числа Рейнольдса от 1 до 1000.

Используя формулы для расчета площади сечения частицы и массы сферической частицы, после ряда преобразований имеем

$$F_x = k m_{\text{ч}} V_{\text{ч}}^2, \quad (6)$$

где $m_{\text{ч}}$ — масса частицы; k — коэффициент.

Коэффициент k определяется по формуле

$$k = \frac{3C_x \rho_{\Gamma}}{8r_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}}}, \quad (7)$$

где $r_{\text{ч}}$ — радиус частицы; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы.

Таким образом, имеем следующую функциональную зависимость:

$$F_x = f(C_x, \rho_{\Gamma}, \rho_{\text{ч}}, v, V_{\text{ч}}), \quad (8)$$

где $C_x = f(T)$; $\rho_{\Gamma} = f(T)$; $\rho_{\text{ч}} = f(T)$; $v = f(T)$; $V_{\text{ч}} = f(t)$.

Для организации обратной связи между механической и тепловой составляющими ММ рассмотрим дифференциальное уравнение движения частицы

$$m_{\text{ч}} \frac{dV_{\text{ч}}}{dt} = m_{\text{ч}} g - F_x, \quad (9)$$

где V — скорость частицы; g — гравитационная постоянная; t — время.

Трансформируем выражение (9) к следующему уравнению в конечных разностях:

$$\Delta V = g \Delta t - \frac{F_x}{m_{\text{ч}}} \Delta t, \quad (10)$$

где ΔV — приращение скорости на данном временном шаге; F_x — сила сопротивления; Δt — выбранный временной шаг расчета.

В соответствии с последним уравнением принимаем следующую блок-схему расчета в ANSYS CFX (рис. 3):

в начальный момент времени принимаем скорость частицы равную скорости ее слета с венца электрода V_0 ;

на каждом временном шаге вычисляем аэродинамическую силу сопротивления с учетом теплового поля и скорости частицы;

осуществляем расчет скорости частицы в текущий момент времени по формуле (8);

после вычисления текущей скорости частицы переходим к следующему временному шагу.

В результате предварительного расчета в среде ANSYS CFX получаем табличную зависимость скорости полета частицы от времени с учетом зависимости теплофизических параметров среды от температуры (табл. 1).

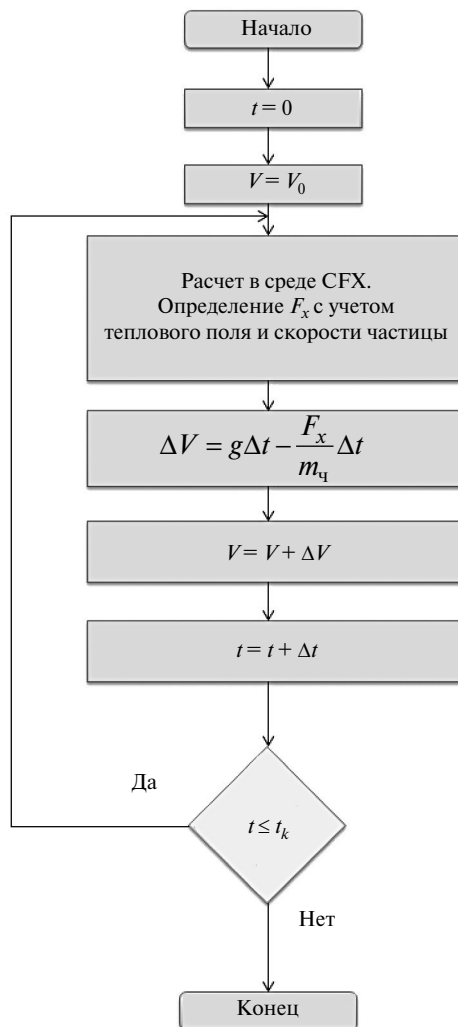


Рис. 3. Блок-схема расчета процесса получения гранул с учетом взаимосвязи аэродинамических и тепловых явлений

По данным таблицы находим аппроксимирующую функцию натурального логарифма скорости полета частицы от времени (рис. 4):

$$y = 271,63x^2 - 47,018x + 4,5235, \quad (11),$$

где $y = \ln V$; $x = t$.

Окончательное выражение для аппроксимирующей функции скорости выглядит следующим образом:

$$V = V_0 \exp(271,63t^2 - 47,018t). \quad (12)$$

Графическая зависимость скорости на входе (INLET) в модели CFX приведена на рис. 5.

Найденную функцию (12) считаем входным скоростным профилем по времени на входе цилиндра и делаем перерасчет с другим временным

шагом Δt (возможно, переменным) и на другом временном интервале.

Для получения более точных и стабильных результатов в начале процесса предварительно проводится стационарный аэродинамический расчет без теплового обмена при $V = V_0$. Полученные результаты служат начальными данными для нестационарного расчета с учетом теплового обмена.

Для решения задачи используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в среде программного комплекса ANSYS Workbench — Fluid Flow (CFX). Пространственный режим — 3D, режим расчета — динамический.

В основу решения задачи в рамках ANSYS CFX положен алгоритм, суть которого заключается в раздельном решении для каждой степени свободы (температура, давление, скорость) системы матриц, полученных конечно-элементной дискретизацией основного уравнения. Цель расчета — получить распределения температуры, давления, скорости в процессе полета частицы.

Применение модели для моделирования процесса охлаждения частицы из сплава ВТ6

В настоящем исследовании выполнено моделирование процесса охлаждения частицы из сплава ВТ6 в газовой смеси аргона и гелия. Для описания процесса охлаждения частиц используются:

1) теплофизические параметры частицы — температура солидус T_{sol} , температура ликвидус T_{liq} , коэффициент теплопроводности λ_c , удельная теплоемкость c_c , плотность материала ρ_c ;

2) теплофизические параметры составляющих газовой смеси (аргон и гелий) — плотность ρ_r , коэффициент теплопроводности λ_r , удельная теплоемкость c_r , плотность газа ρ_r , динамическая вязкость μ_r ;

3. Скорость и направление вылета частицы с электрода.

Поскольку в ANSYS Workbench — Fluid Flow (CFX) не используется такая характеристика, как энтальпия, то для решения задачи Стефана использовалась теплоемкость как функция от температуры, имеющая на участке фазового перехода резкое возрастание. Теплоемкость материала частицы из титанового сплава с учетом фазового перехода представлена на рис. 6.

Обработка скоростного профиля, полученного по обратной связи

Время t , с	Характеристики полета частицы		
	$V(CFX)$, м/м	$\ln(V)$	V_{anal}
0	92,153	4,523	92,153
0,001	88,133	4,479	87,945
0,002	84,086	4,432	83,974
0,003	80,264	4,385	80,226
0,004	76,684	4,340	76,687
0,005	73,321	4,295	73,344
0,006	70,149	4,251	70,184
0,007	67,160	4,207	67,198
0,008	64,340	4,164	64,373
0,009	61,675	4,122	61,701
0,01	59,154	4,080	59,171
0,011	56,770	4,039	56,777
0,012	54,513	3,998	54,508
0,013	52,372	3,958	52,359
0,014	50,340	3,919	50,322
0,015	48,412	3,880	48,390
0,016	46,576	3,841	46,558
0,017	44,833	3,803	44,820
0,018	43,174	3,765	43,170
0,019	41,595	3,728	41,603
0,02	40,092	3,691	40,115
0,02			38,701

Такая замена подтверждена численным моделированием и определяется следующей формулой:

$$H(T) = H_0 + \int_{T_0}^T C_p(\tau) \tau d\tau. \quad (13)$$

Температурный интервал между температурами солидус и ликвидус материала частицы составляет 100 °С (температура солидус $T_{sol} = 1580$ °С, температура ликвидус $T_{liq} = 1680$ °С).

Геометрическое представление модели. Модель построена следующим образом: частица неподвижно располагается в цилиндрической области с движущейся газовой средой, которая представлена профилем скорости $V(t)$. Далее считаем, что частица «перемещается» по оси газового цилиндра заданных размеров и не «конфликтует» с другими частицами. Более того, другие частицы не залетают в заданный цилиндр и не вносят тем самым дополнительных возмущений. Имея в силу приведенных рассуждений

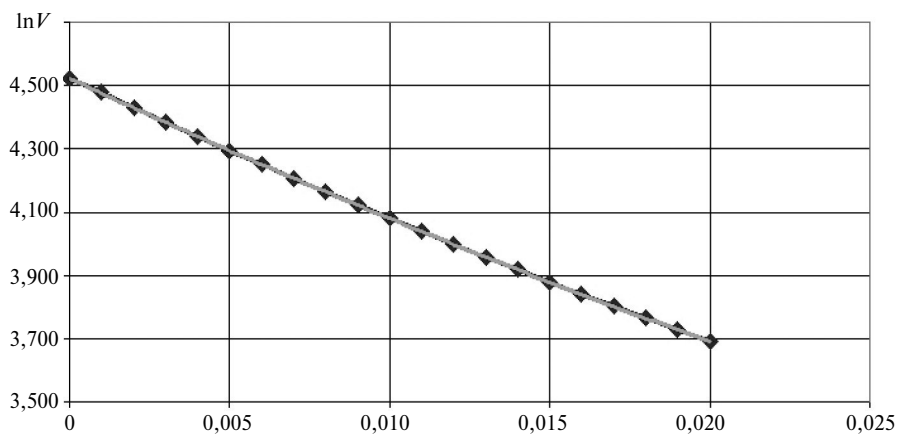


Рис. 4. Аппроксимация $\ln(V)$ с использованием средств Excel
 (◆ — $\ln V$; — — полиномиальная аппроксимация $\ln y = 271,63 \cdot x^2 - 47,018x + 4,5235$ $R^2 = 1$)

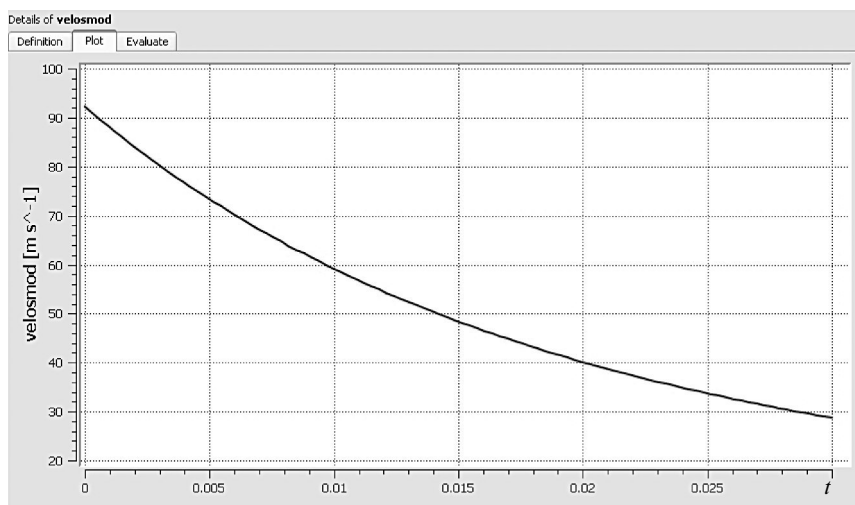


Рис. 5. Временная зависимость скорости на входе (INLET) в модели CFX

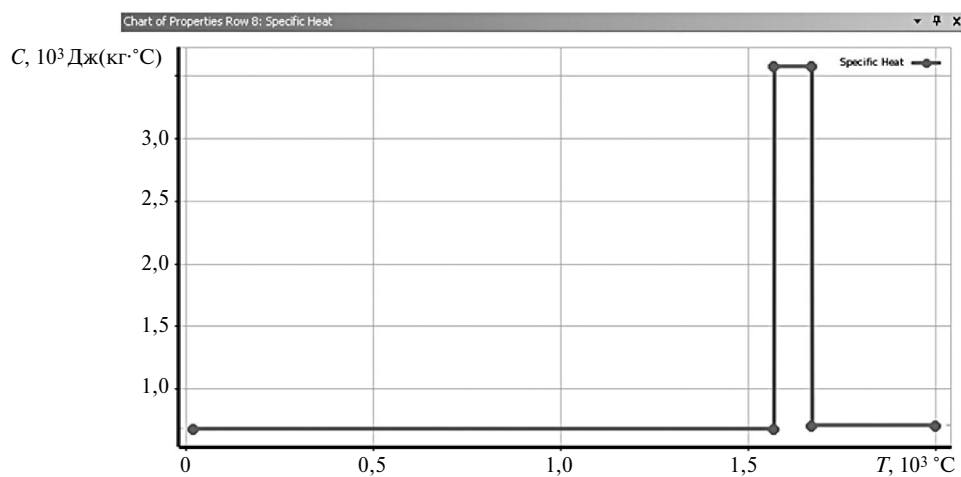


Рис. 6. Зависимость теплоемкости титана от температуры

осесимметричную задачу, рассмотрим $\frac{1}{4}$ часть модели, которая показана на рис. 7. Светлым цветом показан интерфейс между частицей и газовой средой, темным отмечены области симметрии.

Граничные условия модели. Одной из основных задач при моделировании процесса охлаждения частицы в газовой среде является задание нестационарных граничных и начальных условий, которые можно представить в следующем виде:

на входе (INLET) и на стенках цилиндра задается поток газовой среды с профилем скорости $V(t)$;

в области открытой зоны (OPENING) относительное давление равно нулю атмосферы;

в самой области потока газовой среды давление равно 1,2 атмосферы;

температура частицы — 1700 °С;

температура газа на входе — 40 °С;

скорость на входе (INLET) и в самой области равна V_0 .

Разбиение модели на конечные элементы. На рис. 8 представлена сетка конечных элементов (КЭ) модели. Сетка имеет сгущение около пограничного слоя частицы. При разбиении модели на КЭ, чтобы «отследить» пограничные слои по тепломассопереносу вблизи поверхности частицы, газовую среду разбивают на существенно более мелкие конечные элементы, чем вдали от частицы.

Это позволяет корректно решить задачу, которая отличается большими градиентами как по скорости, так и по температуре в газовой среде около частицы.

Результаты расчета. Моделирование процесса охлаждения частицы проводили в газовой среде 90 гелия + 10 аргона %, масс. . Значения теплопроводности, плотности, динамической вязкости и температуры газовой смеси, рассчитанные в среде ANSYS CFX, представлены на рис. 9, 10.

Температурное поле и динамика изменения температуры частицы во времени приведена на рис. 11.

На рис. 11 отчетливо виден фазовый переход из жидкого состояния частицы в твердое, описываемый математически задачей Стефана. Время охлаждения в диапазоне от температуры ликвидус до температуры солидус составляет 0,017 с. Скорость охлаждения частицы из титанового сплава ВТ6 в данном диапазоне равна $6 \cdot 10^3$ °С/с.

Распределение скоростей потока газа в области частицы приведено на рис. 12.

Кроме того, на рис. 12 представлены две графические зависимости скорости полета частицы от времени, полученные на базе аэродинамической модели процесса распыления (верхний график) и модели ANSYS CFX (нижний график).

Отличие динамики изменения скорости частицы во времени можно объяснить зависимостью числа Рейнольдса, коэффициента аэродинамического сопротивления, коэффициента динамической вязкости от температуры.

Точность расчета скорости полета частицы имеет большое прикладное значение: до встречи частицы со стенкой камеры важно уменьшить скорость полета частицы до минимально возможного значения. В этом случае кинетическая энергия частицы, пропорциональная квадрату скорости, окажет небольшое влияние на деформацию частицы.

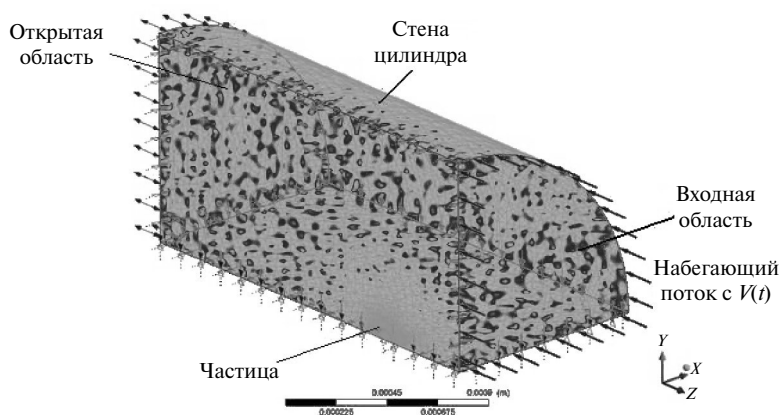


Рис. 7. Стрелками указаны направления потока

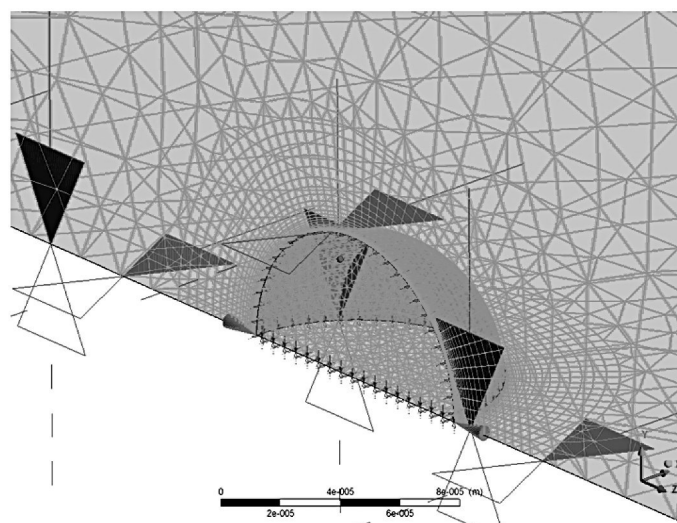


Рис. 8. Конечно-элементное представление модели

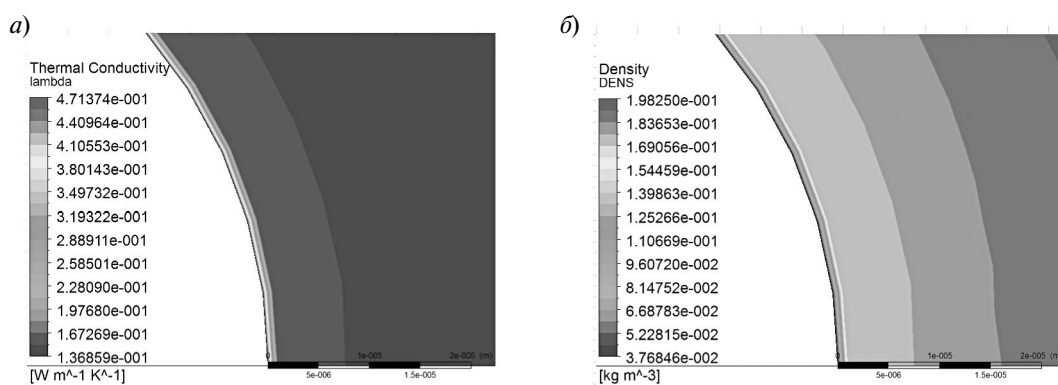


Рис. 9. Распределение коэффициента теплопроводности (а) и плотности (б) газовой смеси в области полета частицы

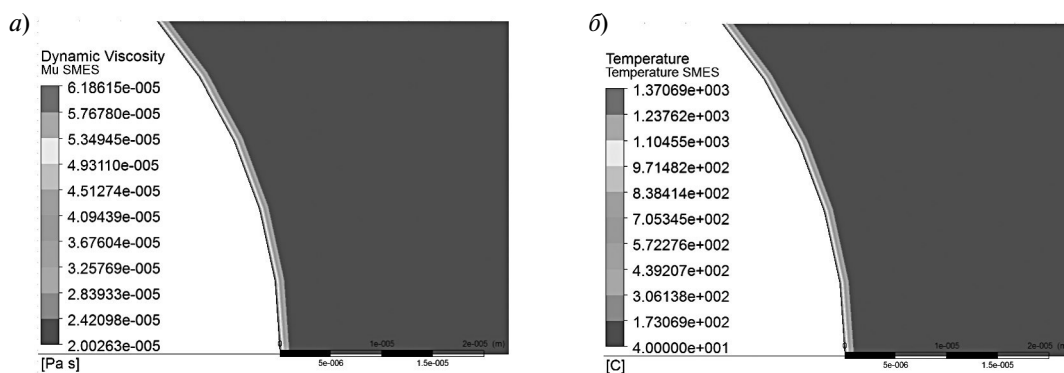


Рис. 10. Распределение коэффициента динамической вязкости (а) и температуры (б) газовой смеси в области полета частицы

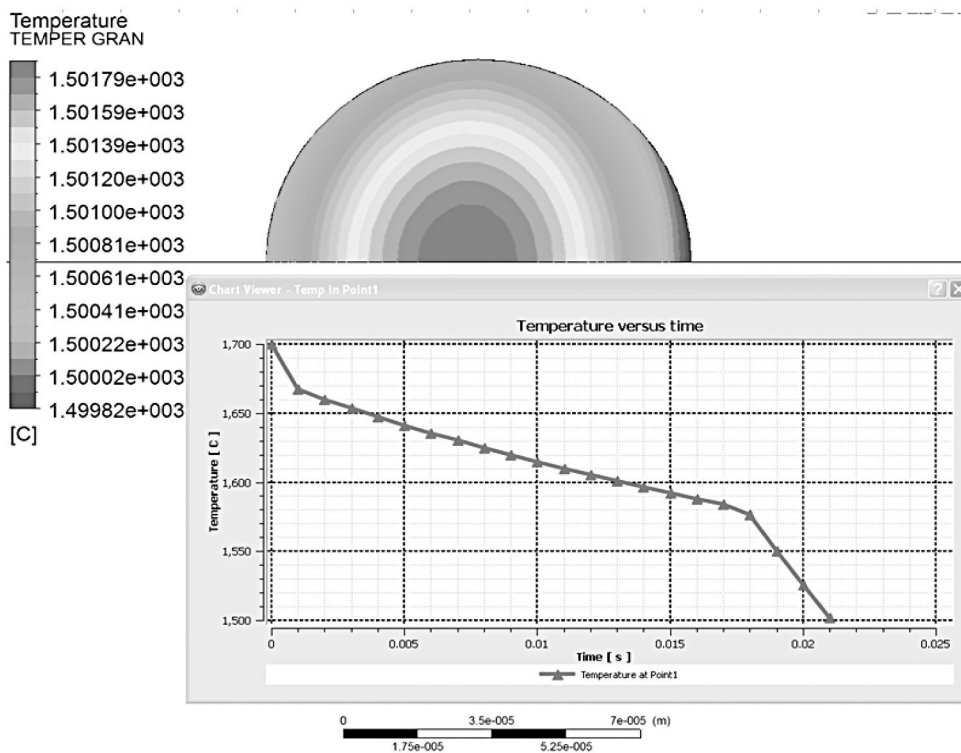


Рис. 11. Температурное поле и динамика изменения температуры частицы от времени

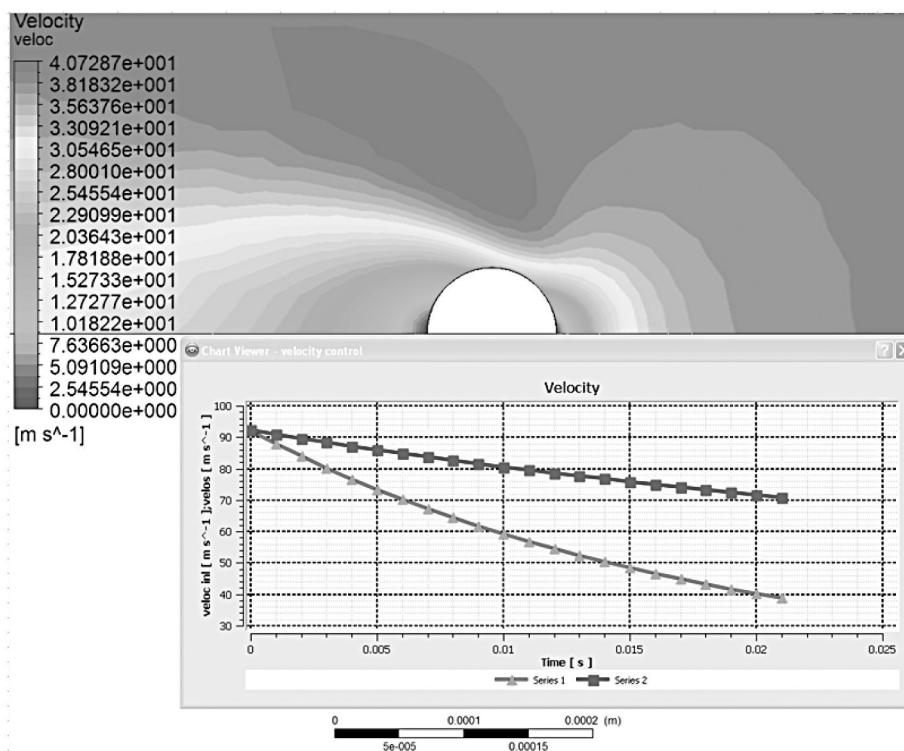


Рис. 12. Графическое представление динамики изменения скорости частицы

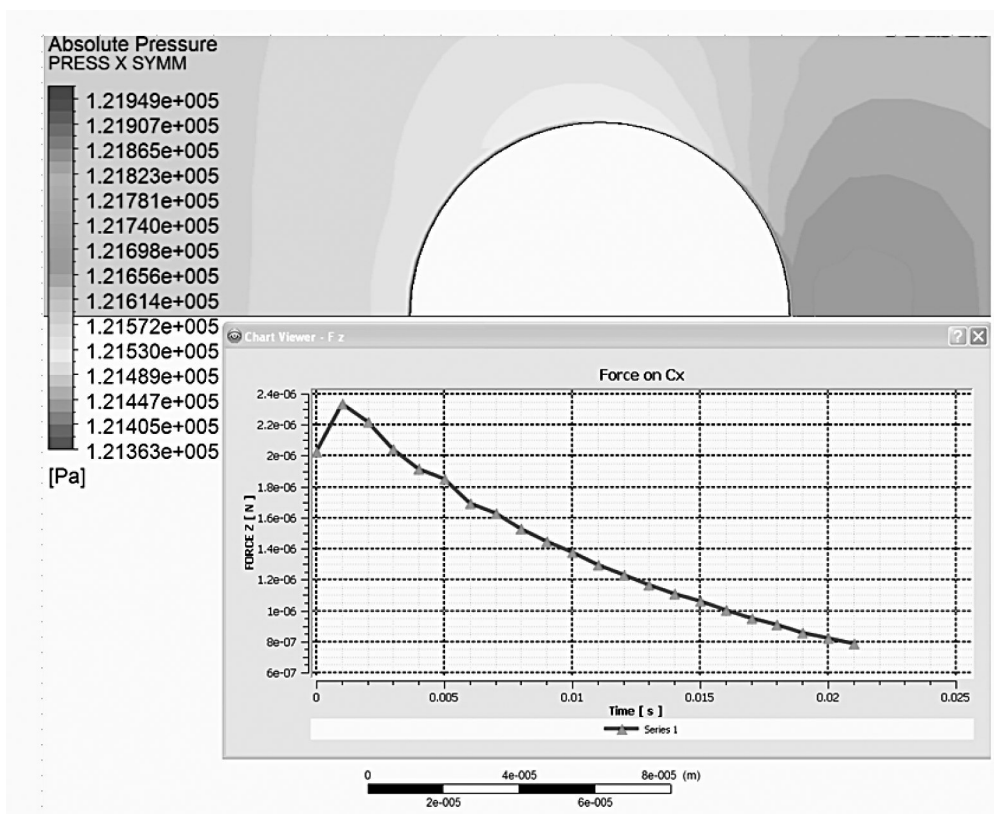


Рис. 13. Распределение давления и силы сопротивления в области полета частицы

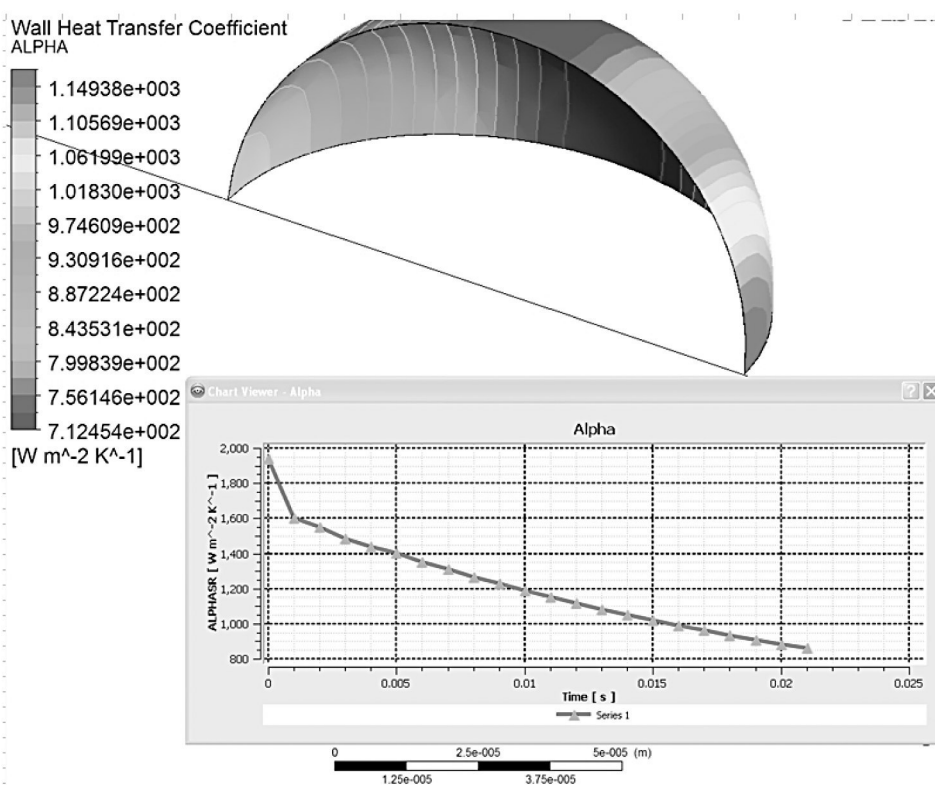


Рис. 14. Зависимость коэффициента теплоотдачи во время полета частицы

В камере распыления инертная среда охлаждения находится при избыточном давлении 0,2 атмосферы. Распределение давления газа в конце полета частицы показано на рис. 13.

В начале полета частицы градиент давления больше, он плавно уменьшается во время полета. По мере увеличения числа Рейнольдса уменьшается влияние коэффициента динамической вязкости на сопротивление частице, в то же время влияние распределения поля давления возрастает и становится доминирующим.

Графическая зависимость коэффициента теплоотдачи во время полета частицы приведена на рис. 14.

Из рис. 14 видно, что коэффициент теплоотдачи при охлаждении частицы в газовой среде гелия и аргона составляет от 2000 Вт/(м²·К) до 900 Вт/(м²·К) в зависимости от времени полета.

Разработана аэротермодинамическая математическая модель процесса получения гранул тугоплавких металлов методом вращающегося электрода с плазменным нагревом, учитывающая механическое и тепловое взаимодействие между частицей и газовой средой.

Выполнено расчетное исследование влияния смеси охлаждающих газов (90 % гелия

и 10 % аргона по массе) на процесс охлаждения частицы титанового сплава ВТ6 с учетом фазового перехода частицы из жидкого состояния в твердое. Установлено, что коэффициент теплоотдачи при охлаждении частицы сплава ВТ6 в газовой среде гелия и аргона составляет от 2000 Вт/(м²·К) до 900 Вт/(м²·К) в зависимости от времени полета.

Показано, что для повышения точности расчета при моделировании процесса охлаждения частицы тугоплавкого металла в газовой среде следует учитывать зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления C_x от скорости полета частицы V_q и температуры T , а также зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости полета частицы V_q .

Показано: при моделировании процесса получения гранул тугоплавких металлов необходимо отдельно выделять стадию кристаллизации за счет увеличения точек экстраполяции для теплоемкости C_p материала частицы, что существенно повышает точность расчета.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по программе поддержки ведущих научных школ РФ (грант № НШ-6413.2014.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжев Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148–155.
3. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
4. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
5. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. August 2012. Vol. 26. №. 8. P. 629–632.
6. Кондратьев С.Ю., Горьнин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
7. Кондратьев С.Ю., Попов В.О. Получение износостойкого квазинаноструктурного поверхностного слоя в сталях и цветных сплавах лазерной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 22–28.
8. Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // Acta Materialia. 2010. № 58. P. 1887–1894.
9. Biaino S., Penna A.U., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M.P. Gennaro P., Badini C. Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure

and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.

10. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2014. № 8. С. 40–45.

11. **Мусяенко В.Т.** Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки // В кн.: *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 41–48.

12. **Орлов В.К.** К инженерному расчету аэродинамики частицы при центробежном распылении рас-

плава // В кн.: *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1984. Вып. 2. С. 33–40.

13. **Орлов В.К.** К расчету скоростей охлаждения капель распыленного металла в газовой среде // В кн.: *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 67–77.

14. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

15. *Теплотехника* / Под ред. А.П. Баскакова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.

16. **Ландау Л.Д., Лифшиц Б.М.** Гидродинамика. Теоретическая физика: Т. VI. М.: Наука, 1986. 736 с.

REFERENCES

1. **Kokorin V.N., Rudskoi A.I., Filimonov V.I., Bulzhev Ye.M., Kondratiev S.Yu.** Teoriya i praktika protsesa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)

2. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsesa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)

3. **Rudskoi A.I., Kokorin V.N., Kondratiev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

4. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskikh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

5. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632. (rus.)

6. **Kondratiev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

7. **Kondratiev S.Yu., Popov V.O.** Polucheniye iznosostoykogo kvazinanostrukturnogo poverkhnostnogo sloya v stalyakh i tsvetnykh splavakh lazernoy obrabotkoy. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. 2011. № 2. S. 22–28.

8. **Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B.** Characterization of titanium aluminate alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*. 2010. № 58. R. 1887–1894.

9. **Biamino S., Penna A.U., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M.P., Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.

10. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynnogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

11. **Musiyenko V.T.** Zakonomernosti obrazovaniya granul pri tsentrobezhnom raspylenii vrashchayushchey zaготовки. *V kn.: Metallurgiya granul*. Vyp. 1. M.: VILS, 1983. S. 41–48. (rus.)

12. **Orlov V.K.** K inzhenernomu raschetu aerodinamiki chastitsy pri tsentrobezhnom raspylenii rasplava. *V kn.: Metallurgiya granul*. Vyp. 2. M.: VILS, 1984. S. 33–40. (rus.)

13. **Orlov V.K.** K raschetu skorostey okhlazhdeniya kapel raspylennogo metalla v gazovoy srede. *V kn. Metallurgiya granul*. Vyp. 1. M.: VILS, 1983. S. 67–77. (rus.)

14. **Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N.** Vychislitel'naya teploperedacha. M.: Yeditorial URSS, 2003. 784 s. (rus.)

15. *Teplotekhnika* / Pod red. A.P. Baskakova. M.: Energoatomizdat, 1991. 224 s. (rus.)

16. **Landau L.D., Lifshits B.M.** Hidrodinamika. Teoreticheskaya fizika: T. VI. M.: Nauka, 1986. 736 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РУДСКОЙ Андрей Иванович — член-корреспондент РАН профессор ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: rector@spbstu.ru

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

КОПАЕВ Владимир Николаевич — ведущий инженер ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: vkopaev_ela@mail.ru

AUTHORS

RUDSKOI Andrei I. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

SOKOLOV Yurii A. — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru

КОПАЕВ Vladimir N. — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: vkopaev_ela@mail.ru