

И.Л. Никулин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБОЛОЧКОВОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ ПЕРЕД ЗАЛИВКОЙ

Исследуется температурное поле в системе литейная форма – печь подогрева формы в вакуумной плавильно-заливочной установке, имеющее место при технологическом процессе изготовления деталей газотурбинных двигателей методом литья по выплавляемым моделям. Настоящая работа посвящена построению математической модели теплового узла, который включает литейную форму, печь её подогрева и другие конструктивные элементы. В работе приведена постановка краевой задачи, результаты моделирования температурного поля и рекомендации по совершенствованию технологического процесса.

Ключевые слова: математическое моделирование, литье по выплавляемым моделям, теплообмен, теплопроводность, излучение, конечно-разностный метод, вычислительный эксперимент.

I.L. Nikulin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

THE MATHEMATICAL MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE ENVELOPE MOLD BEFORE CASTING

The temperature field of the system "mold – mold preheating furnace" is investigated for the melt-cast device that utilized in gas turbine parts producing technological process by envelope casting method. In this paper the mathematical model of preheating furnace unit that includes mold, furnace and thermal screens is worked out. The boundary problem, numerical modeling experiments results and technological process improvements recommendations are given.

Keywords: mathematical modeling, envelope casting, heat exchange, radiation, finite difference method, numerical experiment.

Существующий на протяжении длительного времени процесс изготовления сложных деталей на ОАО «Протон-ПМ» имеет значительный процент брака. При этом на производстве нет достоверной информации о протекающих процессах. Настоящая работа посвяще-

на теоретическому изучению технологии, поскольку понимание физической стороны процессов позволит выявить слабые места, модифицировать технологический процесс так, чтобы уменьшить влияние негативных факторов и повысить выход годной продукции.

Целями настоящей работы являются:

- 1) разработка математической модели теплового узла печи подогрева формы, учитывающей температурные режимы технологического процесса, геометрию промышленной установки и теплофизические свойства применяемых материалов;
- 2) моделирование температурных полей в печи подогрева формы при различных температурах, геометрических параметрах и степенях разрежения;
- 3) анализ результатов моделирования и разработка рекомендаций, направленных на совершенствование технологического процесса.

1. Описание технологического процесса

Вакуумные плавно-заливочные установки (далее – ВПЗУ) применяются для изготовления деталей газотурбинных двигателей. Жаропрочный никелевый сплав заливается в литейную форму из электрокорунда, изготовленную по выплавляемой модели. При открытой вакуумной камере шихта жаропрочного сплава загружается в индукционную печь. Литейная форма сразу после проковки в специальной печи при температуре 950 °С устанавливается в разогретой до температуры (950 ± 20) °С печи подогрева формы (далее – ППФ). Схема теплового узла, частью которого является ППФ, представлена на рис. 1, а. Форма может устанавливаться либо непосредственно на муфель, либо на слой шамотной насыпки, который служит для установки заливочной воронки формы на нужной высоте над ППФ. Литейная форма фиксируется лисами асбеста, укладываемого сверху на корпус ППФ. После этого вакуумная камера закрывается, и воздух откачивается до давления 0,3 мм рт.ст. (40 Па). При установлении достаточного разрежения жаропрочный сплав расплавляют в индукционной печи и заливают в литейную форму.

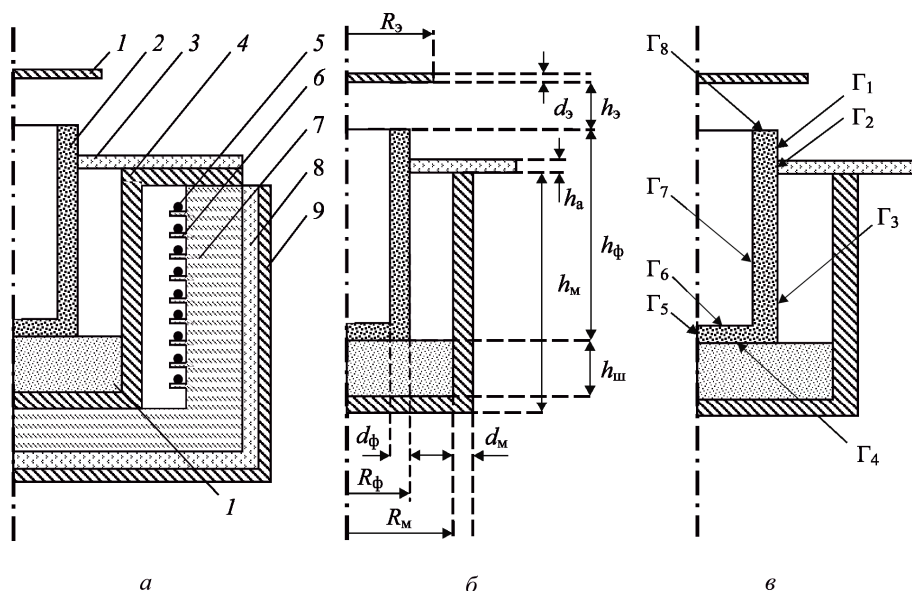


Рис. 1. Схемы теплового узла печи подогрева формы (а), расчетной области (б) и положение граничных условий (в): 1 – защитный экран (сталь); 2 – литейная форма (электрокорунд); 3 – шторка (асбест); 4 – муфель печи (сталь); 5 – нагревательный элемент (нихром); 6 – полочка-крепление нагревательного элемента (шамотный кирпич); 7 – теплоизоляция (шамотный кирпич); 8 – теплоизоляция (асбест); 9 – корпус печи (сталь); 10 – насыпка для установки формы по высоте (шамотная крошка)

Геометрические параметры теплового узла следующие: внешний радиус формы $R_\phi = 50$ мм; толщина стенки формы $d_\phi = 10 \dots 12$ мм; высота $h_\phi = 500$ мм, внутренний радиус муфеля $R_m = 137$ мм; толщина стенки муфеля $d_m = 7$ мм; высота муфеля $h_m = 500$ мм; толщина асбестокартонного листа $h_a = 8$ мм; высота шамотной насыпки $h_\psi = 20$ мм; радиус стального экрана $R_3 = 50$ мм; толщина экрана $d_3 = 10$ мм; расстояние от края формы до экрана $h_3 = 50$ мм.

Теплофизические свойства материалов – плотность ρ , коэффициент теплопроводности λ и удельная теплоемкость c при $(900 \pm 50)^\circ\text{C}$ приведены в таблице в соответствии с [1, 2].

Теплофизические свойства

Материал	Плотность ρ , кг·м ⁻³	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	c , Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
Сталь	7900...8200	25...35	450...650
Электрокорунд	2700	2,2	2100
Шамот	1850...2200	1,2	1180
Асбест	2100...2800	0,08...0,24	1100

2. Математическая модель теплового узла печи подогрева формы

Для построения математической модели были сделаны следующие допущения

1. Тепловой узел имеет цилиндрическую симметрию, азимутальными градиентами пренебрегаем.

2. Технологический процесс прогрева формы в печи достаточно длительный, поэтому распределение температуры в тепловом узле стационарно.

3. В первом приближении пренебрегаем поглощением излучения ввиду малой плотности паров в камере [3, 4].

4. Расчетная область представлена на рис. 1, б, в нее включены: литейная форма, муфель печи подогрева формы, металлический экран, предотвращающий попадание капель металла в форму во время плавления в индукционной печи, асбестовая шторка; шамотная насыпка.

5. На внешнюю боковую поверхность муфеля действует постоянный тепловой поток со стороны нагревательных элементов.

6. Распределение температуры внутри муфеля считается известным.

7. Температура стенки камеры постоянна и известна.

8. Температура шторки различна снаружи и внутри, но не изменяется по радиусу.

9. Пренебрегаем градиентами теплофизических свойств при наличии градиентов температуры внутри технологических объектов.

Исходными данными математической модели являются температуры внутренней боковой поверхности муфеля и вакуумной камеры, геометрия теплового узла и теплофизические свойства материалов.

Поскольку рассматривается стационарное распределение температуры в литейной форме, уравнение переноса тепловой энергии имеет вид

$$\nabla^2 T = 0, \tag{1}$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, T – абсолютная температура.

Краевые условия для литейной формы представлены граничными условиями, записанными для зон формы с различным теплообменом (рис. 1, в).

Г₁: Часть формы, возвышающаяся над асбокартонной шторкой отдаёт тепло излучением вакуумной камере

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{1к}(T_{\phi} - T_{к}) + \alpha_{1а}(T_{\phi} - T_{а}), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности формы; T_{ϕ} – температура поверхности формы; $T_{к}$ – температура камеры; $T_{а}$ – температура внешней поверхности асбокартонной шторки; $\alpha_{1к}$ – коэффициент теплоотдачи излучением *форма – камера*; $\alpha_{1а}$ – коэффициент теплоотдачи излучением *форма – асбокартонная шторка*. Вид коэффициентов теплоотдачи определяется из соотношения

$$\alpha_{1i} = \varphi_{1i} \sigma \varepsilon_i (T_{\phi} + T_i)(T_{\phi}^2 + T_i^2), i = а, к, \quad (3)$$

где φ_{1i} – угловой коэффициент, значения которого определены в [5, 6]; σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Г₂: При неидеальном контакте формы с асбестовой шторкой теплота отводится в соответствие с уравнением

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{\phi} - T_{а}}{\chi_{\phi а}}, \quad (5)$$

где $\chi_{\phi а}$ – термическое сопротивление *форма – асбестовая шторка*.

Г₃: Во внутренней полости поверхность формы участвует в радиационном теплообмене с внутренними поверхностями асбокартонной шторки, муфеля и шамотной насыпки, формула теплообмена имеет вид [7]

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{3а}(T_{\phi} - T_{а}) + \alpha_{3м}(T_{\phi} - T_{м}) + \alpha_{3ш}(T_{\phi} - T_{ш}). \quad (6)$$

Здесь и далее по тексту коэффициенты теплоотдачи излучением α_{1i} аналогичны таковым в формуле (3).

Г₄: Дно муфеля не нагревается тепловыделяющими элементами, поэтому нижняя часть формы отдает теплоту в шамотную насыпку

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_{\phi} - T_{\text{ш}}}{\chi_{\text{фш}}}, \quad (7)$$

где $\chi_{\text{фш}}$ – тепловое сопротивление на границе форма – шамотная насыпка.

Г₅: Ось симметрии формы адиабатическая

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (8)$$

Г₆: Донная часть формы находится в условиях радиационного теплообмена с внутренними боковыми стенками, а также со стальным экраном. Граничное условие имеет вид

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{6\phi}(T_{\text{фд}} - T_{\text{фб}}) + \alpha_{6э}(T_{\text{фд}} - T_{\text{э}}), \quad (9)$$

где $T_{\text{фд}}$ и $T_{\text{фб}}$ – температуры дна формы и боковой внутренней стенки.

Г₇: Внутренняя боковая поверхность формы обменивается тепловым излучением с дном формы, стенкой вакуумной камеры и стальным экраном. В этой зоне также имеет место и самооблучение. Граничное условие имеет вид

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{7б}(T_{\text{фб}} - T_{\text{фд}}) + \alpha_{7к}(T_{\text{фб}} - T_{\text{к}}) + \alpha_{7э}(T_{\text{фб}} - T_{\text{к}}) + q_{\text{со}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{7б}$, $T_{\text{фб}}$ – коэффициент теплоотдачи и температура внутренней боковой стенки формы; $q_{\text{со}}$ – тепловой поток, вернувшийся за счет самооблучения.

Г₈: Торцевая часть стенки формы излучает в сторону экрана и стенки камеры

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{8э}(T_{\text{фт}} - T_{\text{э}}) + \alpha_{8к}(T_{\text{фт}} - T_{\text{к}}), \quad (11)$$

где $T_{\text{фт}}$ – температура на торце литейной формы.

Математическая модель реализована в виде программы на языке Fortran. Уравнения (1)–(11) представлены конечно-разностными аналогами и решается итерационно по явной схеме.

3. Результаты численных экспериментов

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования температурного поля в тепловом узле печи подогрева формы. Анализ температурных полей при различных температурах муфеля показал, что неоднородности температурного поля сосредоточены на торцах формы, наибольшие перепады температуры сосредоточены в верхней части, которая отдаёт тепло излучением в вакуумную камеру (см. рис. 2). Температура в центральной части формы практически совпадает с температурой муфеля, отличие не превышает 1°C , в нижней части формы температура ниже на $10\text{--}12^{\circ}\text{C}$, выравнивание температур происходит через 150 мм от дна. В верхней части формы наблюдаются значительное отклонение, которое достигает 150°C и более, выравнивание наблюдается через 100 мм (см. рис. 3). Отклонения температур в различных частях формы от температуры муфеля зависят от температуры муфеля линейно. При увеличении температуры муфеля в форме возрастают градиенты температуры, что вызвано увеличением тепловых потоков как со стороны муфеля, так и с торцевой поверхности формы в объём вакуумной камеры.

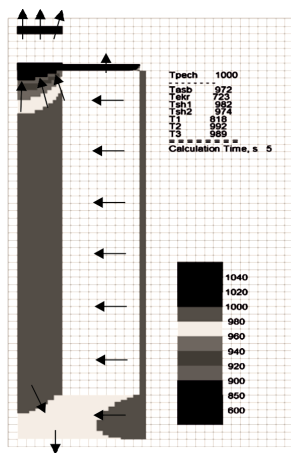


Рис. 2. Температурное поле при $T_m = 1000^{\circ}\text{C}$ с указанием тепловых потоков

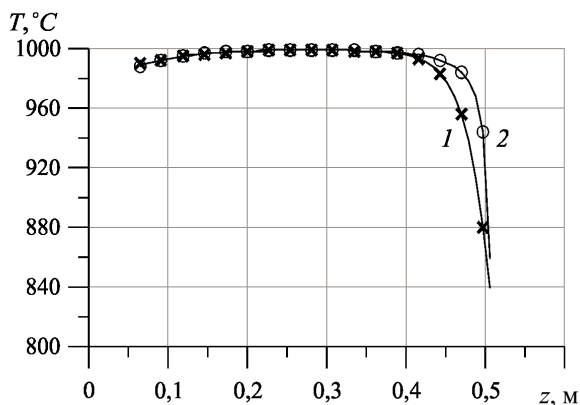


Рис. 3. Распределение температуры по высоте формы при $T_m = 1000^{\circ}\text{C}$:
1 – поверхность; 2 – половина радиуса формы

На рис. 4 приведены результаты моделирования различных вариантов теплового узла, применяемых в технологическом процессе. Видно, что на распределение температуры в верхней части формы заметно влияют асбокартонная шторка и стальной экран, предназначенный для защиты горловины литейной формы от брызг металла: удаление любого из элементов увеличивает протяженность зоны значительно более холодной, нежели муфель.

Увеличение площади теплоотдачи, связанное с увеличением радиуса формы, также приводит к увеличению более холодной зоны.

На протяженность более холодной зоны влияют два фактора: первый – увеличение тепловых лучистых потоков, вызванное увеличением площади теплоотдачи или понижением температуры окружающей среды; второй – понижение подвода тепла от муфеля, которое может быть вызвано понижением его температуры.

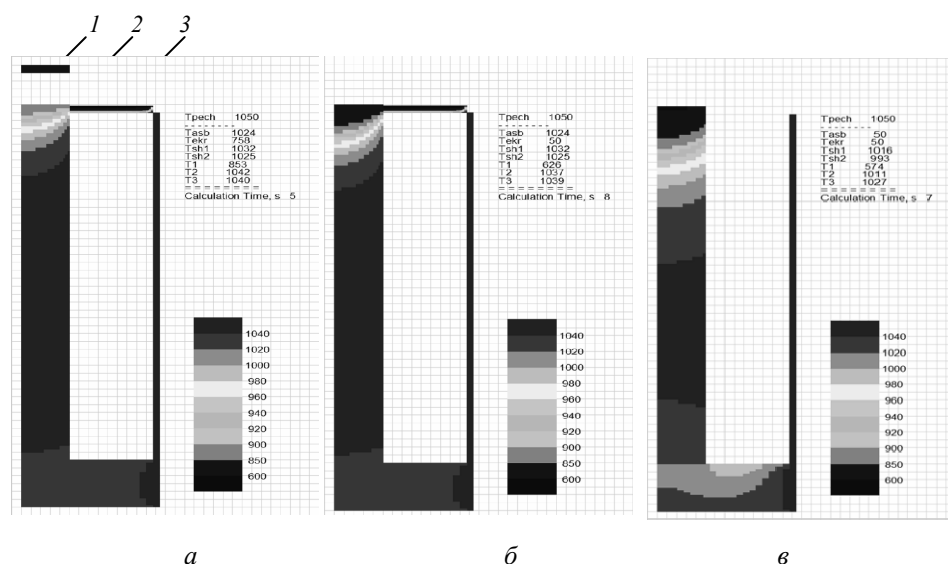


Рис. 4. Температурные поля при различных конфигурациях теплового узла:

1 – стальной экран; 2 – литейная форма; 3 – асбокартонная шторка;

a – присутствуют экран и шторка; *б* – экран убран, присутствует только шторка; *в* – нет ни экрана, ни шторки

Для уменьшения отклонения температур от номинальной в верхней части формы следует экранировать тепловое излучение. Отсутствие асбокартонной шторки негативно сказывается на одно-

родности температурного поля – увеличивает глубину более холодной зоны.

Увеличить эффективность экранирования можно при помощи модификации теплового узла, показанной на рис. 5. Во-первых, следует избегать возвышения литейной формы над асбестокартонной шторкой. Во-вторых, защитный стальной экран следует приблизить к литейной форме, насколько это технологически возможно. В-третьих, покрытие стального экрана со стороны литейной формы низкотеплопроводным материалом позволит уменьшить тепловой поток через экран. На рис. 6 показаны рассчитанные тепловые поля для существующего и предлагаемого вариантов.

Из рис. 6 видно, что в предложенном варианте неоднородность температурного поля значительно меньше. Таким образом, предлагаемая модификация позволит точнее выбирать температуру формы, необходимую для получения качественной отливки.

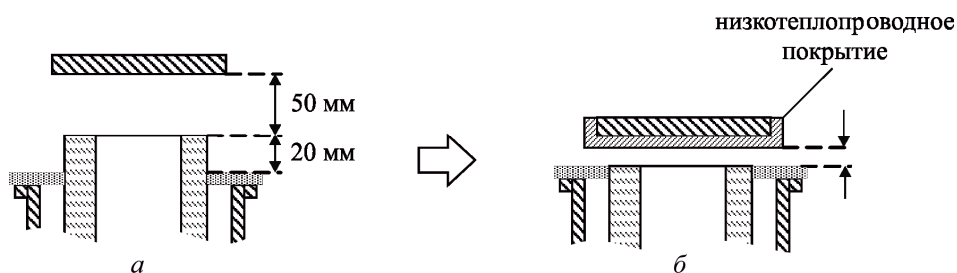


Рис. 5. Предлагаемое усовершенствование теплового узла:
а – существующая конструкция; *б* – предлагаемая конструкция

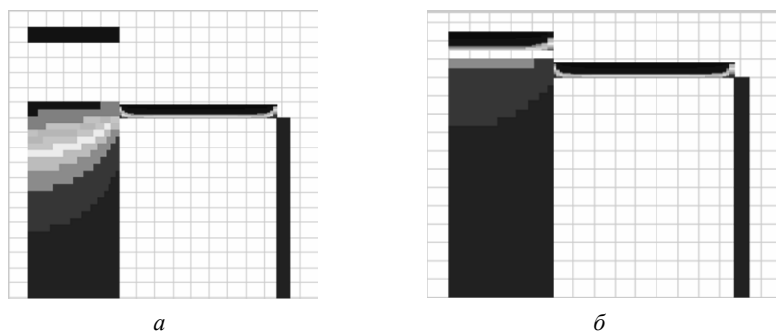


Рис. 6. Температурные поле в верхней части формы, полученные при вычислительном эксперименте: *а* – для существующего варианта; *б* – для предлагаемого варианта

4. Заключение

Разработана математическая модель, содержащая постановку краевой задачи теплопроводности для литейной формы в условиях теплообмена излучением в зазоре между литейной формой муфелем и с внешней стороны формы с вакуумной камерой, а также перенос тепла разреженным газом; программу, реализующую численный алгоритм, которая позволяет рассчитывать температурные поля в тепловом узле печи подогрева формы.

При помощи разработанной программы выполнено моделирование температурных полей в тепловом узле печи подогрева формы вакуумной плавильно-заливочной установки. При моделировании провариваются параметры технологического процесса, смоделированы различные варианты размещения экранов в тепловом узле.

Выявлены закономерности влияния параметров технологического процесса на температурное поле литейной формы, дано объяснение механизмам определяющим характер температурного поля.

На основе анализа результатов вычислительных экспериментов даны практические рекомендации, которые позволят сделать температурное поле в литейной форме более однородным. Создание однородного температурного поля важно для точного выбора температуры формы при заливке металла и, следовательно, повышения качества отливок.

Библиографический список

1. Физические величины: справ. / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.]; под ред. И.И. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Свойства элементов: справ.: в 2 кн. / под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1997. – Кн. 1. – 432 с.
3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
4. Вакуумная техника: справ. / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова [и др.]; под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
5. Блох А.Г., Журавлёв Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

6. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. – Л.: Энергия (Ленингр. отд-е) 1971. – 294 с.

7. Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 230 с.

References

1. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.M. [et al.] Fizicheskie velichiny [Physical quantities]. Eds. I.I. Grigor'ev, E.Z. Melikhov. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991, 1232 p.

2. Svoystva jelementov. Kniga 1 [Properties of elements. Book 1]. Ed. M.E. Dric. Moscow: Metallurgija, 1997, 432 p.

3. Kutateladze S.S. Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie [Transmission and hydrodynamic resistance]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990, 367 p.

4. Frolov E.S., Minajchev V.E., Aleksandrova A.T. [et al.] Vakuumnaja tehnika [Vacuum equipment]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 480 p.

5. Blokh A.G., Zhuravlev Ju.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem [Heat exchange by radiation]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991, 432 p.

6. Spjerrou Je.M., Sess R.D. Teploobmen izlucheniem [Heat exchange by radiation]. Leningrad: Jenergija, 1971, 294 p.

7. Caplin A.I. Teplofizika v metallurgii [Thermophysics in metallurgy]. Perm': Permskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2008, 230 p.

Получено 26.09.2013

Об авторах

Никулин Илларион Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nil@live.ru).

About the authors

Nikulin Illarion Leonidovich (Perm, Russia) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: nil@live.ru).