

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ  
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ  
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL  
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,  
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.74.045

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-463-470

Оригинальная статья  
Original article

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ В НЕЙ СТАЛЬНОЙ ШАРООБРАЗНОЙ ОТЛИВКИ. ЧАСТЬ 2

В. И. Одинокоев, А. И. Евстигнеев<sup>✉</sup>, Э. А. Дмитриев,  
А. Н. Намоконов, А. А. Евстигнеева, Д. В. Чернышова

Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

✉ [diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

**Аннотация.** В статье приведены результаты численного решения задачи по моделированию процесса возможного трещинообразования в оболочковой форме (ОФ) шарообразной конфигурации при заливке в нее жидкой стали и охлаждении затвердевающей отливки. Численная схема осесимметричной задачи и алгоритм решения были приведены в части 1. Трещиностойкость оценивается по величине нормальных напряжений в керамической ОФ в процессе ее совместного охлаждения с затвердевающей отливкой. При детальном анализе результатов были учтены поля перемещений, напряжений, температур как в сферической ОФ, так и в нарастающей корочке затвердевшего металла. При решении учитывалось изменение модуля сдвига материала формы от температуры, и была дана оценка этого уточнения. Задачу решали двумя способами. Первый – с постоянным модулем сдвига ОФ; второй – с модулем сдвига ОФ, зависящим от температуры. Между этими вариантами есть существенная разница в величине нормальных напряжений, возникающих в ОФ. Авторы проанализировали стойкости ОФ сферической геометрии от внешних воздействий со стороны опорного наполнителя (ОН) оболочковой формы и заливочной воронки. Была решена задача по определению контактной и свободной поверхностей на границе ОФ и ОН. Результаты решения задачи представлены графически в виде эпюр напряжений, температур по исследуемой области в разных ее сечениях и временных интервалах охлаждения ОФ и нарастающей корочки металла. Показана роль сжимающих нормальных напряжений  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  на поверхности соприкосновения ОФ с жидким металлом в начальный момент охлаждения на вероятность трещинообразования в сферической форме. Уровень напряженно-деформированного состояния в сферической ОФ при охлаждении в ней стальной отливки существенно определяется зависимостью модуля сдвига ОФ от температуры.

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям, оболочковая форма, напряженное состояние, моделирование, трещинообразование

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда № 24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.

**Для цитирования:** Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Намоконов А.Н., Евстигнеева А.А., Чернышова Д.В. Напряженно-деформированное состояние керамической оболочковой формы при формировании в ней стальной шарообразной отливки. Часть 2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(4):463–470. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-463-470>

## STRESS-STRAIN STATE OF CERAMIC SHELL MOLD DURING FORMATION OF SPHERICAL STEEL CASTING IN IT. PART 2

V. I. Odinokov, A. I. Evstigneev<sup>✉</sup>, E. A. Dmitriev,  
A. N. Namokonov, A. A. Evstigneeva, D. V. Chernyshova

Komsomolsk-na-Amure State University (27 Lenina Ave., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681013, Russian Federation)

✉ [diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

**Abstract.** The paper presents the results of numerical calculations of the solution to the problem of modeling the process of possible cracking in a spherical shell mold when pouring liquid steel into it and cooling the solidifying casting. The numerical scheme of the axisymmetric problem and

the algorithm for its solution were given in Part 1. The crack resistance is estimated by magnitude of the normal stresses in the ceramic shell during its co-cooling with a solidifying casting. The results detailed analysis considered: fields of displacement, stresses, and temperatures both on spherical surface and in growing crust of solidified metal. The solution took into account the change in the shear modulus of the mold material from temperature, and an assessment of this refinement was given. The problem was solved in two ways. The first – with a constant shift modulus of the shell mold; the second – with its temperature-dependent shift modulus. There is a significant difference between these variants in terms of magnitude of the normal stresses arising in the shell mold. The authors analyzed resistance of the shell mold spherical geometry to external influences from its support filler and filling funnel. The problem of determining the contact and free surfaces at the boundary of the shell mold and support filler was solved. The results are presented graphically in the form of diagrams of stresses and temperatures over the studied area in its different sections and time intervals for cooling of the growing metal crust. The role of compressive normal stresses  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  on the surface of contact of the shell mold with liquid metal at the initial moment of cooling on probability of cracking in a spherical mold is shown. The level of strain-stress state in a spherical shell mold when cooling a steel casting in it is significantly determined by dependence of shift modulus of the shell mold on temperature.

**Keywords:** investment casting, shell mold, stressed state, modeling, cracking

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.

**For citation:** Odnokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Namokonov A.N., Evstigneeva A.A., Chernyshova D.V. Stress-strain state of ceramic shell mold during formation of spherical steel casting in it. Part 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):463–470.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-463-470>

## ВВЕДЕНИЕ

Ранее исследования по влиянию напряженно-деформированного состояния (НДС) на ее трещиностойкость при заливке жидким металлом и охлаждении совместно с затвердевающей отливкой проводились на оболочковой форме (ОФ) для литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) в виде стояка, имеющего как цилиндрическую, так и сферическую форму (зумпф). Проведено множество теоретических и экспериментальных исследований по установлению особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) керамической оболочковой формы и получаемых отливок в литье по выплавляемым моделям: по влиянию на НДС материалов выплавляемых моделей [1; 2], формы и геометрии ОФ [3; 4], толщины стенки формы [5; 6], материала формы [7; 8], геометрии отливок [9–11], методов испытаний формы на прочность и пр. [12; 13].

Математическое моделирование рассматриваемых процессов также представлено в других работах (методы моделирования [14], исследований [15–17], с использованием численного моделирования [18–20], специальных математических моделей [21–23] и программных средств [24; 25].

Вызывает как научный, так и практический интерес изготовление отливок шаровой и сферической форм при помощи ЛВМ, а значит, и стойкость ОФ к трещинообразованию при формировании в ней таких отливок. Именно на решение этой задачи и направлены материалы настоящей работы.

В работе [26] приведены общая постановка задачи по построению математической модели по определению НДС и температуры в ОФ при охлаждении в ней сферической отливки, численная схема и алгоритм решения задачи с использованием разработанных комплексов программ [27; 28]. В настоящей работе представлены результаты теоретического и численного исследований решения поставленной задачи.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе [26] изложена общая постановка задачи по охлаждению шарообразной отливки в оболочковой форме.

На рис. 1 представлена расчетная схема исследуемого процесса с учетом осевой симметрии (здесь угол  $\alpha$  определяет величину окна литниковой воронки, а угол  $\varphi$  – величину охвата ОФ опорным наполнителем (ОН)).

### Исходные данные

Геометрические параметры:  $S = 5$  мм,  $R_1 = 20$  мм.

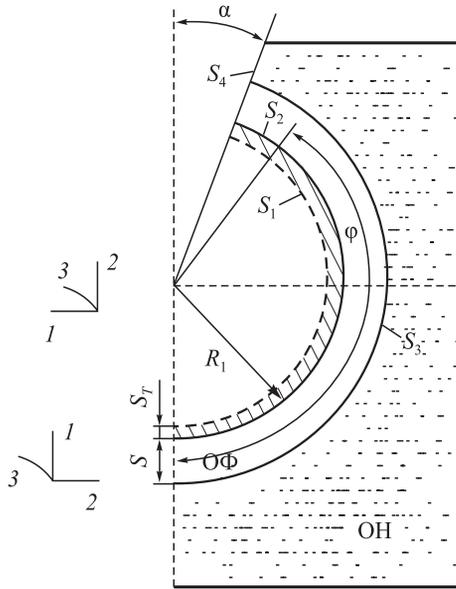
Временные интервалы  $\Delta t_n$ : 0,1; 1,0; 2,0; 4,0; 5,0; 5,0; 5,0; 10,0; 10,0; 1,0; 2,0; 5,0; 1,0; 1,0; 3,0; 3,0; 5,0; 10,0 с; параметр трения на поверхности  $S_3$  (рис. 1) принимается  $\psi = 0,001$ .

Разбиение области:  $N_1 \times N_2 = 10 \times 30$ .

Приняты следующие физические параметры разливаемой стали при температуре  $\theta > 1000$  °С ( $\theta_m^* = 1500$  °С):  $G = 1000$  кг/мм<sup>2</sup> (модуль сдвига);  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$  °С<sup>-1</sup> (коэффициент линейного расширения);  $\lambda = 0,0298$  Вт/(мм·°С) (коэффициент теплопроводности);  $L = 270 \cdot 10^3$  Дж/кг (скрытая теплота плавления);  $C = 444$  Дж/(кг·°С) (удельная теплоемкость);  $\gamma = 7,80 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup> (удельная масса);  $\theta_k = 1450$  °С (температура кристаллизации).

Физические свойства керамической формы:  $G_\phi = 2910$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\alpha = 0,51 \cdot 10^{-6}$  °С<sup>-1</sup>;  $\lambda = 0,000812$  Вт/(мм·°С);  $C = 840$  Дж/(кг·°С);  $\gamma = 2,0 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>.

Некоторые результаты теоретического исследования показали [29], что при охлаждении стали в ОФ с величиной  $\alpha$  10 и 30° и  $\varphi = (180 - \alpha)$  имеют место значительные сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ , которые могут превосходить предел прочности керамики при сжатии. Причем при  $\alpha = 30^\circ$  напряжения  $\sigma_{ii}$ ,  $i = 2, 3$  несколько меньше по абсолютной величине, чем при  $\alpha = 10^\circ$ . На рис. 2 приведены эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{11}$  в ОФ при  $\alpha = 10^\circ$  поз. а – через 7,1 с охлаждения, поз. б – через 51,1 с.



**Fig. 1.** Расчетная схема шарообразной ОФ, заформованной в опорный наполнитель и залитой жидким металлом, с учетом осевой симметрии:

ЖМ – жидкий металл; ТМ – твердый металл;

ОФ – оболочковая форма; ОН – опорный наполнитель;

$S_1$  – внутренняя поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла;  $S_2$  – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и оболочковой формы;  $S_3$  – внешняя поверхность оболочковой формы;  $S_4$  – свободная поверхность торца литниковой чаши ОФ;  $R_1$  – радиус шарообразной отливки;

$S$  – толщина оболочковой формы;  $S_7$  – толщина корочки затвердевшего металла;  $\alpha$  – угол наклона литниковой воронки;

$\varphi$  – угол охвата поверхности оболочковой формы опорным наполнителем

**Fig. 1.** Calculation scheme of a spherical ceramic shell mold molded in support filler and filled with liquid metal, taking into account axial symmetry:

ЖМ – liquid metal; ТМ – solid metal; ОФ – shell mold;

ОН – support filler;  $S_1$  – inner contact surface of liquid and solidified metal;

$S_2$  – inner contact surface of solidified metal and shell mold;

$S_3$  – outer surface of shell mold;  $S_4$  – free surface of the end face of casting cup;

$R_1$  – radius of spherical casting;  $S$  – thickness of shell mold;

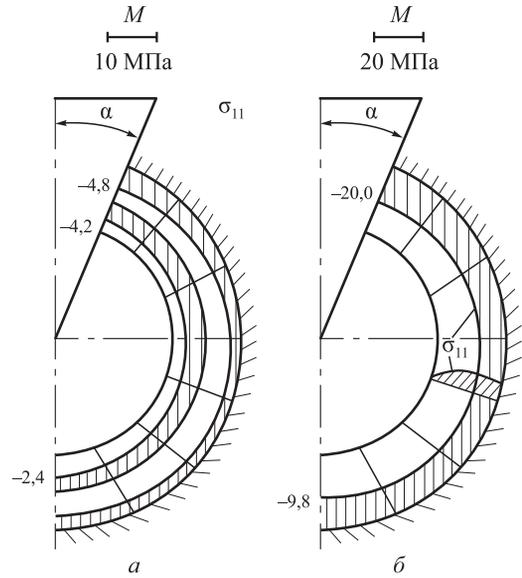
$S_7$  – thickness of solidified metal crust;  $\alpha$  – slope angle of funnel;

$\varphi$  – angle of enclosing surface of shell mold with a support filler

На рис. 3 приведены эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  в образующей корочки металла через 60,1 с охлаждения отливки; сплошными линиями показаны эпюры при  $\alpha = 30^\circ$ ; штриховыми –  $\alpha = 10^\circ$ .

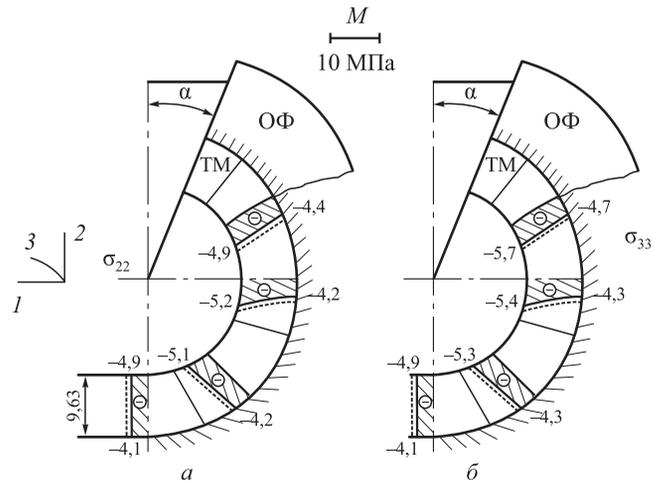
Величина  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  на поверхности, примыкающей к жидкому металлу, больше (по модулю), чем на поверхности ОФ, это объясняется тем, что модуль сдвига  $G_m$  образующегося твердого металла принят постоянным (1000 кг/мм<sup>2</sup>), независящим от температуры. Также как и в ОФ, напряжения  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  – сжимающие и при  $\alpha = 10^\circ$  они больше, чем при  $\alpha = 30^\circ$ .

На рис. 4, а показаны эпюры напряжений  $\sigma_{11}$  в корочке закристаллизовавшегося металла через 60,1 с. Напряжения  $\sigma_{11}$  – сжимающие по всему сечению: сплошными линиями обозначены  $\sigma_{11}$  при  $\alpha = 30^\circ$ , штриховыми – при  $\alpha = 10^\circ$ .



**Fig. 2.** Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{11}$  в ОФ при  $\alpha = 10^\circ$  при времени охлаждения отливки 7,1 с (а) и 51,1 с (б)

**Fig. 2.** Diagrams of normal stresses  $\sigma_{11}$  in shell mold at  $\alpha = 10^\circ$  and time of casting cooling 7.1 s (a) and 51.1 s (b)



**Fig. 3.** Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  (а) и  $\sigma_{33}$  (б) в образующей корочки металла при  $\alpha = 30^\circ$  (сплошные линии) и  $\alpha = 10^\circ$  (штриховые линии) и времени охлаждения отливки 60,1 с

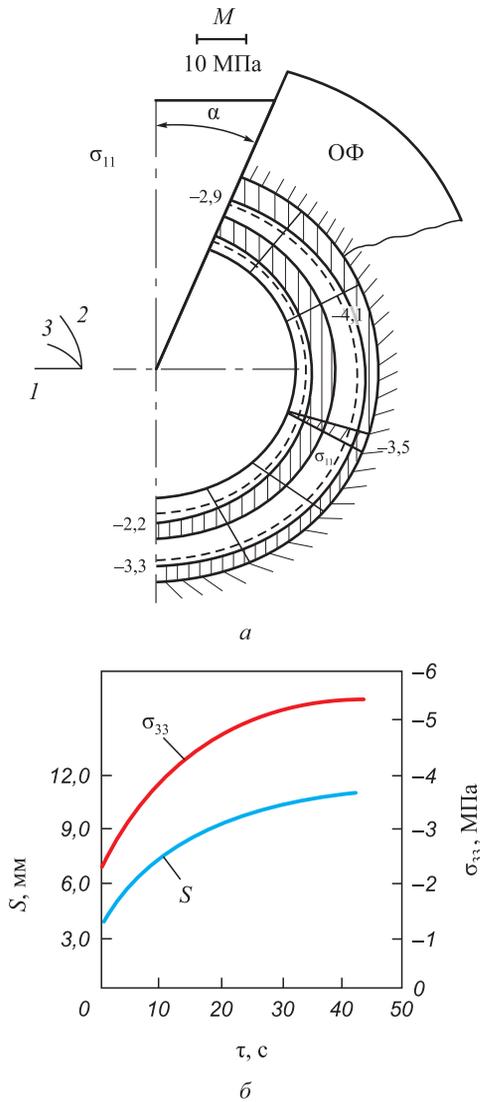
**Fig. 3.** Diagrams of normal stresses  $\sigma_{22}$  (a) and  $\sigma_{33}$  (b) in forming metal crust at  $\alpha = 30^\circ$  (solid lines) and  $\alpha = 10^\circ$  (dashed lines) and time of casting cooling 60.1 s

На рис. 4, б показаны кривые роста величины корочки  $S$  и напряжения  $\sigma_{33}$  со временем охлаждения. С увеличением угла  $\alpha$  нормальные напряжения незначительно уменьшаются (по модулю).

Дальнейшее увеличение  $\alpha$  не имеет смысла, поскольку идет нарастание корочки металла при незначительном изменении нормальных напряжений.

Результаты получены при постоянной (средней) величине модуля сдвига ОФ ( $G_\phi$ ).

Как следует из работы [29], температура в ОФ, примыкающей к кристаллизующемуся металлу, очень



**Рис. 4.** Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{11}$  (а) в закристаллизовавшейся корочке металла через время охлаждения отливки 60,1 с и кривые роста величины корочки металла ( $S$ ) и напряжений  $\sigma_{33}$  (б) со временем охлаждения

**Fig. 4.** Diagrams of normal stresses  $\sigma_{11}$  (a) in crystallized metal crust after casting cooling for 60.1 s and growth curves of metal crust ( $S$ ) and stresses  $\sigma_{33}$  (b) with cooling time

высока (порядка 1300 °С). При такой температуре керамика находится практически в размягченном состоянии, а значит и модуль сдвига в ней будет намного ниже, чем средняя величина  $G_{\phi}$  оболочковой формы. Воспользуемся экспериментальными данными (рис. 5), полученными в работе [30] при испытании керамических образцов, выполненных из связующего материала ( $\text{SiO}_2 + \text{MgPO}_4$ ).

Аппроксимируя результаты, представленные на рис. 5, получим:

$$G_{\phi} = 6412 - 6,37\theta, \text{ кг/мм}^2 \text{ при } 300 \text{ }^\circ\text{C} < \theta < 1000 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$G_{\phi} = 40 \text{ кг/мм}^2 \text{ при } \theta \geq 1000 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$G_{\phi} = 4500 \text{ кг/мм}^2 \text{ при } \theta < 300 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Результаты решения с изменяющимся от температуры модулем сдвига ОФ приведены на рис. 6 при  $\alpha = 10^\circ$  в виде эпюр  $\sigma_{ii}, i = 1, 2, 3$  при  $\tau = 1, 12$  с – сплошные линии;  $\tau = 7, 12$  с – штриховые линии.

При термическом ударе и времени охлаждения  $\tau = 1, 12$  с напряжения  $\sigma_{22}, \sigma_{33}$  имеют наибольшие значения (по абсолютной величине) в ОФ в зоне контакта с металлом, но уже резко меняются со временем охлаждения. Все нормальные напряжения – сжимающие. Напряжения  $\sigma_{33}$  в образующейся корочке  $S = 6$  мм через  $\tau = 7, 12$  с приведены на рис. 7.

При дальнейшем охлаждении напряжения  $\sigma_{ii}$  уменьшаются.

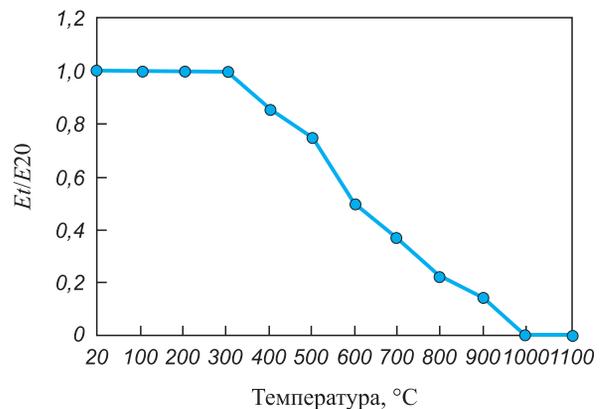
Наиболее опасен к разрушению начальный период охлаждения ( $0 < \tau < 8$  с) (рис. 6).

На рис. 8, 9 приведены результаты расчета при  $\alpha = 30^\circ, \tau = 1, 12$  с (сплошные линии);  $\tau = 7, 12$  с (штриховые линии).

Как видим, картина примерно та же, но значения  $\sigma_{ii}, i = 1, 2, 3$  несколько ниже, чем при  $\alpha = 10^\circ$ , даже появились небольшие растягивающие напряжения  $\sigma_{22}, \sigma_{33}$  в ОФ на стыке с ОН (рис. 8). В корочке металла  $S = 6$  мм при  $\tau = 7, 12$  с приведены напряжения  $\sigma_{33}$  (рис. 9), они также ниже, чем при  $\alpha = 10^\circ$  (рис. 3, б).

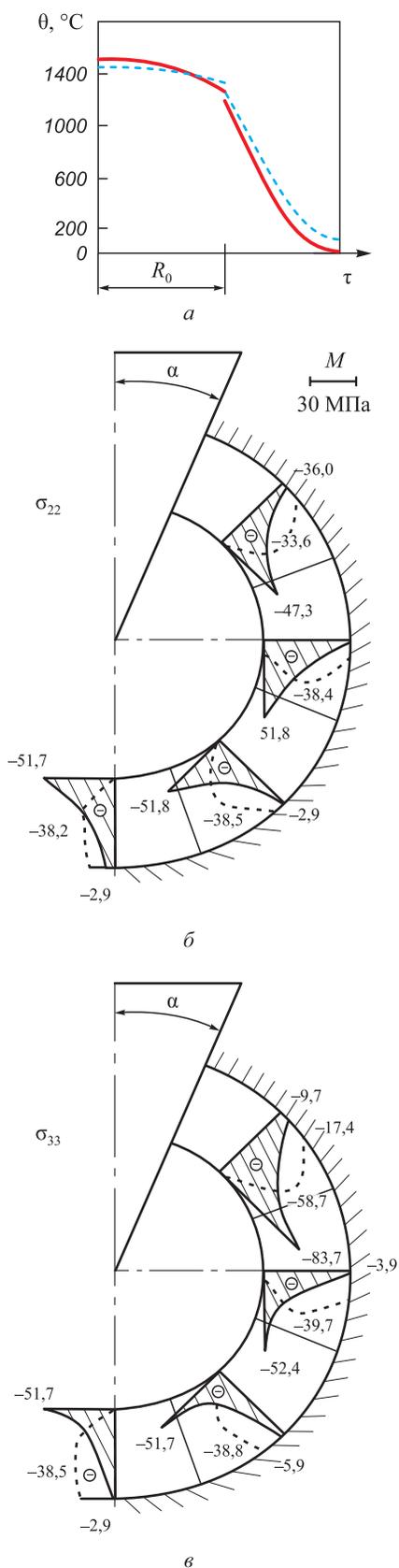
$\text{SiO}_2 + \text{MgPO}_4$

$T$	$E$	$E\theta/E20$	$G, \text{ МПа}$	Кэф. объемн. расширения
20	11250000000	1,0000	45 000	4,44444 E-06
100	11250000000	1,0000	45 000	4,44444 E-06
200	11250000000	1,0000	45 000	4,44444 E-06
300	11250000000	1,0000	45 000	4,44444 E-06
400	9642857143	0,8571	38 571	5,18519 E-06
500	8437500000	0,7500	33 750	5,92593 E-06
600	5625000000	0,5000	22 500	8,88889 E-06
700	4218750000	0,3750	16 875	1,18519 E-05
800	2596153846	0,2308	10 385	1,92593 E-05
900	1687500000	0,1500	6750	2,96296 E-05
1000	96428571	0,0086	386	5,18519 E-04
1100	61363636	0,0055	245	8,14815 E-04



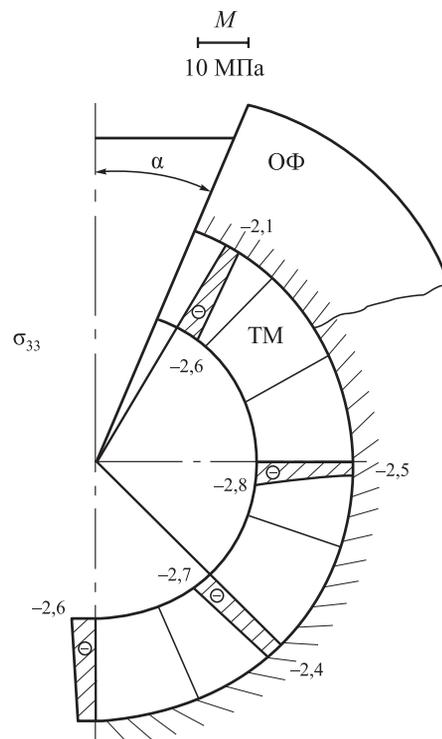
**Рис. 5.** Экспериментальные данные при испытании керамических образцов, выполненных из связующего материала ( $\text{SiO}_2 + \text{MgPO}_4$ )

**Fig. 5.** Experimental data on tests of ceramic samples made of a binder ( $\text{SiO}_2 + \text{MgPO}_4$ )



**Рис. 6.** Поле температур (а), эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  (б) и  $\sigma_{33}$  (в) в ОФ при  $\alpha = 10^\circ$  и времени охлаждения отливки 1,12 с (—) и 7,12 с (---)

**Fig. 6.** Temperatures field (a), diagrams of normal stresses  $\sigma_{22}$  (b) and  $\sigma_{33}$  (c) in ceramic mold at time of casting cooling 1.12 s (—) and 7.12 s (---)



**Рис. 7.** Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{33}$  в образующейся металлической корочке ( $S = 6$  мм) при времени охлаждения отливки 7,12 с

**Fig. 7.** Diagrams of normal stresses  $\sigma_{33}$  in resulting metal crust ( $S = 6$  mm) at time of casting cooling 7.12 s

Дальнейшее охлаждение показывает, что нормальные напряжения падают, а эпюры  $\sigma_{ii}$  при  $\tau = 32,12$  и  $52,12$  с близки друг к другу.

Что касается вопроса влияния материала цилиндрической ОФ на ее стойкость, то такие результаты были представлены в предыдущих работах авторов, где в рассматриваемом случае наиболее опасными для возможного трещинообразования в ОФ являются растягивающие нормальные напряжения  $\sigma_{22}$  в наружном (внешнем) слое оболочки, контактирующем с опорным наполнителем.

Учет зависимости модуля сдвига в ОФ от температуры существенно влияет на напряженно-деформированное состояние в ОФ при охлаждении в ней стальной отливки. При принятых внешних воздействиях на процесс охлаждения металла в сферической ОФ стойкость ее к разрушению в начальный момент заливки является проблематичной.

### Выводы

Осуществлено более корректное решение задачи с учетом изменения модуля сдвига материала формы от температуры, что существенно отразилось на результатах решения. Анализ НДС в ОФ сферической формы при заливке в нее стальной отливки показал, что опасными являются сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  на

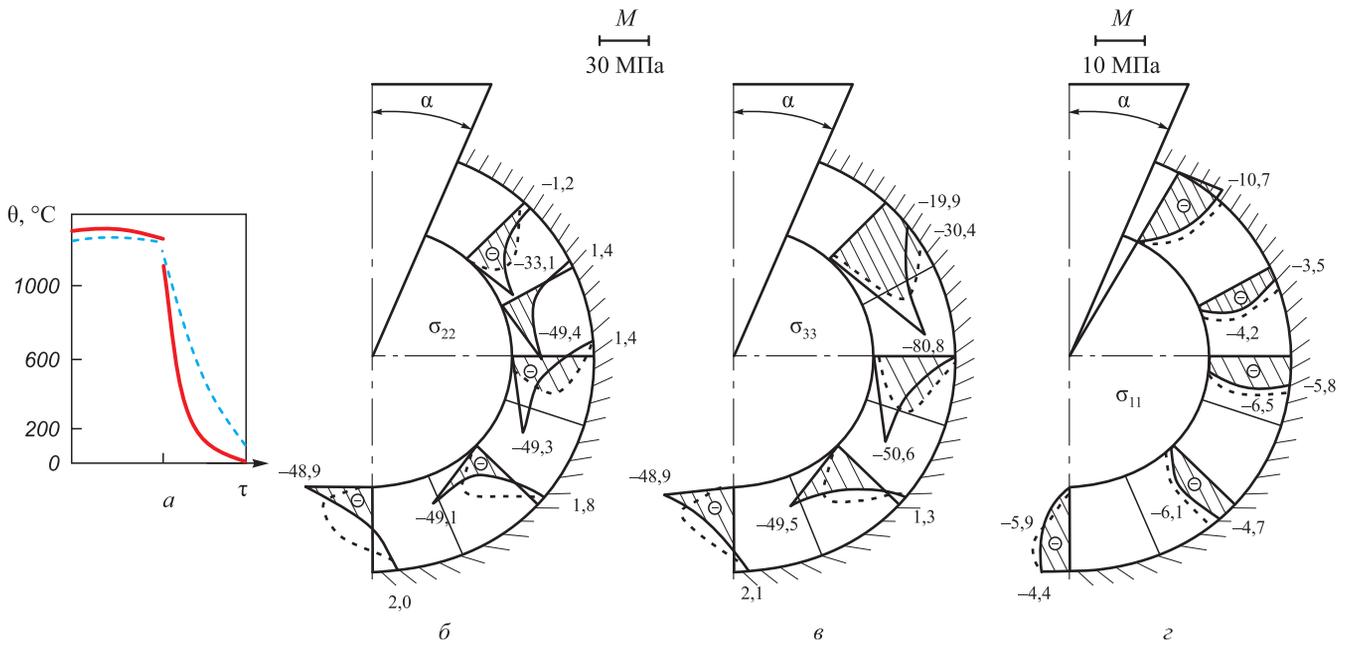


Рис. 8. Поле температур (а), эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{22}$  (б),  $\sigma_{33}$  (в) и  $\sigma_{11}$  (г) в ОФ при  $\alpha = 30^\circ$  через время охлаждения отливки 1,12 с (—) и 7,12 с (---)

Fig. 8. Temperatures field (a), diagrams of normal stresses  $\sigma_{22}$  (b),  $\sigma_{33}$  (c) and  $\sigma_{11}$  (d) at  $\alpha = 30^\circ$  after casting cooling for 1.12 s (—) and 7.12 s (---)

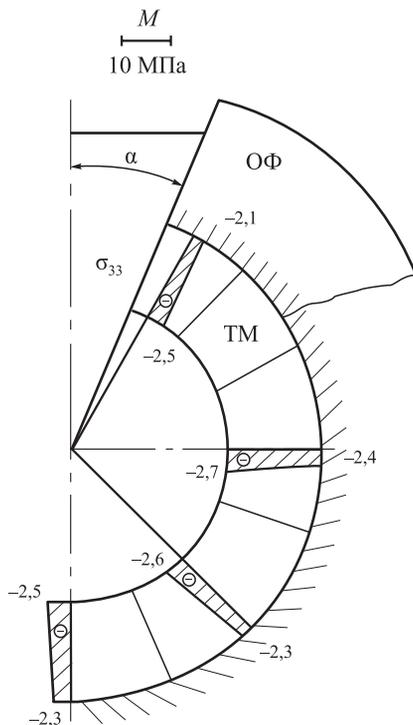


Рис. 9. Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{33}$  в образующейся корочке металла через время охлаждения отливки 7,12 с ( $\alpha = 30^\circ$ )

Fig. 9. Diagrams of normal stresses  $\sigma_{33}$  in formed metal crust after casting cooling for 7.12 s ( $\alpha = 30^\circ$ )

поверхности соприкосновения ОФ с жидким металлом в начальный момент охлаждения. Значительные сжимающие напряжения  $\sigma_{11}$  (до 10 МПа) на поверхности

соприкосновения ОФ с ОН указывают на возможность и необходимость дальнейшего теоретического исследования данного процесса посредством моделирования величины поверхности охвата ОН сферической ОФ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bansode S.N., Phalle V.M., Mantha S.S. Optimization of process parameters to improve dimensional accuracy of investment casting using Taguchi approach. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019;11(4):1–12. <https://doi.org/10.1177/1687814019841460>
2. Mittal Y.G., Kamble P., Gote G., Patil Y., Patel A. K., Bernard A., Karunakaran K.P. Mathematical modelling of pattern sublimation in rapid ice investment casting. *International Journal of Metalcasting*. 2022;16(2):1002–1009. <http://dx.doi.org/10.1007/s40962-021-00665-w>
3. Kanyo J.E., Schafföner S., Uwanyuze R.Sh., Leary K.S. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys. *Journal of the European Ceramic Society*. 2020;40(15):4955–4973. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013>
4. Rafique M.M.A., Iqbal J. Modeling and simulation of heat transfer phenomena during investment casting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(7–8):2132–2139. <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.11.007>
5. Singh R. Mathematical modeling for surface hardness in investment casting applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012;26:3625–3629. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-012-0854-0>
6. Jafari H., Idris M. H., Ourdjini A. Effect of thickness and permeability of ceramic shell mould on in situ melted AZ91D investment casting. *Applied Mechanics and Materials*.

- 2014;465–466:1087–1092.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1087>
7. Bansode S.N., Phalle V.M., Mantha S. Taguchi approach for optimization of parameters that reduce dimensional variation in investment casting. *Archives of Foundry Engineering*. 2019;19(1):5–12.  
<https://dx.doi.org/10.24425/afe.2018.125183>
  8. Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(11):2332–2348.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
  9. Zhang J., Li K.W., Ye H.W., Zhang D.Q., Wu P.W. Numerical simulation of solidification process for impeller investment casting. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;80–81:961–964.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.961>
  10. Dong Y.W., Li X.L., Zhao Q., Jun Y., Dao M. Modeling of shrinkage during investment casting of thin walled hollow turbine blades. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;244:190–203.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.005>
  11. Rakoczy Ł., Cygan R. Analysis of temperature distribution in shell mould during thinwall superalloy casting and its effect on the resultant microstructure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;18(4):1441–1450.  
<https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.05.008>
  12. Yameng W., Zhigang L. The design of testing methods for strength of ceramic shell mold in investment casting. *Proceedings of the Asia-Pacific Conf. on Intelligent Medical 2018 & Int. Conf. on Transportation and Traffic Engineering*. 2018;336–341. <https://doi.org/10.1145/3321619.3321686>
  13. Kolczyk J., Zych J. High temperature strength of ceramic moulds applied in the investment casting method. *Archives of Foundry Engineering*. 2011;11(3):121–124.
  14. Anglada E., Meléndez A., Maestro L., Domínguez I. Finite element model correlation of an investment casting process. *Materials Science Forum*. 2014;797:105–110.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.797.105>
  15. Liu C., Sun J., Lai X., He B., Li F. Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;77:1191–1203.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6523-y>
  16. Liu C., Wang F., Jin S., Li F., Lai X. Permafrost analysis methodology (PAM) for ceramic shell deformation in the firing process. *International Journal of Metalcasting*. 2019;13(4):953–968.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s40962-019-00317-0>
  17. Everhart W.A., Lekakh S.N., Richards V., Chen J., Li H., Chandrashekhara K. Corner strength of investment casting shells. *International Journal of Metalcasting*. 2013;7:21–27.  
<https://doi.org/10.1007/BF03355541>
  18. Sabau A.S. Numerical simulation of the investment casting process. *Transactions of American Foundry Society*. 2005;113:407–417.
  19. Zheng K., Lin Y., Chen W., Liu L. Numerical simulation and optimization of casting process of copper alloy water-meter shell. *Advances In Mechanical Engineering*. 2020;12(5):1–12.  
<http://dx.doi.org/10.1177/1687814020923450>
  20. Manzari M.T., Gethin D.T., Lewis R.W. Optimisation of heat transfer between casting and mould. *International Journal of Cast Metals Research*. 2000;13(4):199–206.  
<https://doi.org/10.1080/13640461.2000.11819402>
  21. Rafique M.M.A., Shah U. Modeling and simulation of heat transfer phenomenon related to mold heating during investment casting. *Engineering*. 2020;12(5):291–314.  
<http://dx.doi.org/10.4236/eng.2020.125024>
  22. Dong Y., Bu K., Zhang D. Numerical simulation of displacement field of solidification process for investment casting. In: *2008 Asia Simulation Conf. – 7<sup>th</sup> Int. Conf. on System Simulation and Scientific Computing*. 2008:715–720.  
<https://doi.org/10.1109/asc-iscs.2008.4675453>
  23. Upadhyaya G.K., Das S., Chandra U., Paul A.J. Modelling the investment casting process: a novel approach for view factor calculations and defect prediction. *Applied Mathematical Modelling*. 1995;19(6):354–362.  
[https://doi.org/10.1016/0307-904X\(95\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0307-904X(95)90001-0)
  24. Khan M.A.A., Sheikh A.K. Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016;230(10):1799–1817.  
<https://doi.org/10.1177/0954405416640183>
  25. Banerjee S., Sutradhar G. Analysis of casting defects in investment casting by simulation. *Advances in Materials, Mechanical and Industrial Engineering: Selected Contributions from the First Int. Conf. on Mechanical Engineering, Jadavpur University, Kolkata, India*. Springer International Publishing, 2019:247–271.  
[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-96968-8\\_12](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-96968-8_12)
  26. Одиноков В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Намоконов А.Н., Евстигнеева А.А., Чернышова Д.В. Напряженно-деформированное состояние керамической оболочковой формы при формировании в ней стальной шарообразной отливки. Часть 1. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(2):211–218.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-211-218>  
 Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Namokov A.N., Evstigneeva A.A., Chernyshova D.V. Stress-strain state of ceramic shell mold during formation of spherical steel casting in it. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(2):211–218.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-211-218>
  27. Одиноков В.И., Прокудин А.Н., Сергеева А.М., Севастьянов Г.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012111389. ОДИССЕЙ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.
  28. Одиноков В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Иванкова Е.П. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021111121 «Программа математического моделирования оптимизации выбора температуры опорного наполнителя, физических свойств материала и структуры оболочковой формы по выплавляемым моделям для повышения ее трещиностойкости при охлаждении в ней отливки». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.04.2021 г.
  29. Евстигнеев А.И., Одиноков В.И., Дмитриев Э.А., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. О трещиностойкости керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям при затвердевании в ней шарообразной стальной отливки. *Литейное производство*. 2022;(9):22–25.  
 Evstigneev A.I., Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A., Ivankova E.P. On the crack resis-

tance of a ceramic shell mold according to smelted models when a spherical steel casting solidifies in it. *Liteinoe proizvodstvo*. 2022;(9):22-25. (In Russ.).

30. Одинокое В.И., Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.В. Математическое моделирование сложных технологических процессов. Москва: Наука; 2008:178.

### Сведения об авторах

### Information about the Authors

**Валерий Иванович Одинокое**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0003-0200-1675  
**E-mail:** 79122718858@yandex.ru

**Valerii I. Odinokov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0003-0200-1675  
**E-mail:** 79122718858@yandex.ru

**Алексей Иванович Евстигнеев**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0002-9594-4068  
**E-mail:** diss@knastu.ru

**Aleksei I. Evstigneev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0002-9594-4068  
**E-mail:** diss@knastu.ru

**Эдуард Анатольевич Дмитриев**, д.т.н., доцент, ректор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0001-8023-316X  
**E-mail:** rector@knastu.ru

**Eduard A. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Rector, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0001-8023-316X  
**E-mail:** rector@knastu.ru

**Александр Николаевич Намоконов**, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0009-0003-9269-7713  
**E-mail:** namokonovsasha@mail.ru

**Aleksandr N. Namokonov**, Postgraduate, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0009-0003-9269-7713  
**E-mail:** namokonovsasha@mail.ru

**Анна Алексеевна Евстигнеева**, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0003-0667-2468  
**E-mail:** annka.ewstic@mail.ru

**Anna A. Evstigneeva**, Student, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0003-0667-2468  
**E-mail:** annka.ewstic@mail.ru

**Дарья Витальевна Чернышова**, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
**ORCID:** 0000-0001-5142-2455  
**E-mail:** daracernysova744@gmail.com

**Dar'ya V. Chernyshova**, Postgraduate, Komsomolsk-on-Amur State University  
**ORCID:** 0000-0001-5142-2455  
**E-mail:** daracernysova744@gmail.com

### Вклад авторов

### Contribution of the Authors

**В. И. Одинокое** – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование и корректировка финальной версии статьи.

**V. I. Odinokov** – scientific guidance, analysis of research results, editing and correction of the article final version.

**А. И. Евстигнеев** – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, подготовка текста.

**A. I. Evstigneev** – formation of the article concept, definition of the purpose and objectives of the study, analysis of research results, writing the text.

**Э. А. Дмитриев** – проведение расчетов, их анализ, подготовка и корректировка текста.

**E. A. Dmitriev** – conducting calculations and their analysis, writing and correction of the text.

**А. Н. Намоконов** – проведение расчетов, подготовка библиографического списка, обработка графического материала.

**A. N. Namokonov** – conducting calculations, preparation of references, processing of graphic material.

**А. А. Евстигнеева** – проведение расчетов, подготовка текстового и графического материала.

**A. A. Evstigneeva** – conducting calculations, preparation of the text and graphic material.

**Д. В. Чернышова** – обработка расчетных результатов, подготовка графического материала.

**D. V. Chernyshova** – processing of calculated results, preparation of graphic material.

Поступила в редакцию 19.04.2024  
 После доработки 24.05.2024  
 Принята к публикации 25.05.2024

Received 19.04.2024  
 Revised 24.05.2024  
 Accepted 25.05.2024