



Оригинальная статья

УДК 621.74.045

DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-285-293

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2300>

ВЛИЯНИЕ ОПОРНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ И СТРУКТУРЫ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ НА ЕЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

В. И. Одинокоев, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев,
Д. В. Чернышова, А. А. Евстигнеева

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

Аннотация. В последнее время большое внимание исследователи уделяют вопросу влияния внутренних и внешних факторов на напряженное состояние оболочковой формы (ОФ). К внутренним факторам следует отнести ее морфологическое строение, виды, связи между контактирующими слоями. К внешним факторам следует отнести все виды силового и температурного воздействий на внешнюю поверхность оболочковой формы. В работе установлено влияние эффекта скольжения контактируемых между собой внутренних слоев на уровень напряженного состояния ОФ. Представлена математическая модель по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) в многослойной ОФ при ее заливке жидким металлом. Оболочковая форма выполнена таким образом, что ее слои могут скользить друг относительно друга с наличием трения. Рассматриваемые вопросы являются продолжением последних работ авторов, в которых дана оценка влияния опорного наполнителя (ОН) и макроструктуры ОФ на ее НДС. При этом слои ОФ имеют одинаковые физико-механические свойства. В работе ставилась задача определить силовое влияние ОН и нагрузки в верхней части ОФ на НДС в ее сечениях. Влияние ОН оценивалось по величине трения между наружными поверхностями ОФ и ОН. Для решения задачи использовалась линейная теория упругости, уравнения теплопроводности, численные методы. На контакте наружной поверхности ОФ с поверхностью ОН решалась контактная задача. Твердая фаза в жидком металле при остывании определялась из уравнения межфазового перехода. Результаты расчетов представлены в виде графиков и эпюр. Отсутствие трения между слоями понижает трещиностойкость многослойной ОФ.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, оболочковая форма, напряженное состояние, моделирование, трещинообразование, трение между контактирующими поверхностями, напряжение, перемещение

Для цитирования: Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А. Влияние опорного наполнителя и структуры оболочковой формы на ее трещиностойкость // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 285–293.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-285-293>

Original article

INFLUENCE OF SUPPORT FILLER AND STRUCTURE OF SHELL MOLD ON ITS CRACK RESISTANCE

V. I. Odinokov, A. I. Evstigneev, E. A. Dmitriev,
D. V. Chernyshova, A. A. Evstigneeva

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

Abstract. Recently, researchers have been paying more and more attention to the influence of internal and external factors on stress state of shell mold (SM). Internal factors should include morphological structure of SM, its types and connections between the contacting layers. External factors should include all types of force and temperature effects on SM external surface. The purpose of this work was to establish the sliding effect of SM internal layers in contact with each other on the level of SM stress state. The mathematical model for determining the stress-strain state (SSS) in the multilayer SM when it is filled with a liquid metal is presented. Moreover, the SM is made in such a way that its layers can slide relative to each other with the presence of friction. This work is a continuation of the recent works of the authors, where the influence of the temperature factor on the studied SM was estimated. At the same time, SM layers have the same physical and mechanical properties. The problem was solved in the same formulation as in the previous works of the authors. The task was set to determine the influence of the support filler (SF) and the clamp in the upper part of SM on SSS

in its sections. The influence of SF was estimated by the amount of friction between the outer surfaces of SM and SF. Just as in the previous works of the authors, the linear theory of elasticity, heat conduction equations, and numerical methods were used to solve the problem. On the contact of SM outer surface with SF surface, the contact problem was solved. Solid phase in the liquid metal during cooling was determined from the equation of interphase transition. Results of the calculations are presented in the form of graphs and plots. It is shown that the absence of friction between the layers reduces the crack resistance of SM multilayer.

Keywords: casting by investment models, shell mold, stress state, modeling, cracking, friction between contacting surfaces, stress, displacement

For citation: Odiokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A. Influence of support filler and structure of shell mold on its crack resistance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 285–293. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-285-293>

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением исследований по стойкости оболочковой формы (ОФ) при получении в ней металлической отливки. В работах [1–3] с помощью математического моделирования исследовали напряженно-деформированное состояние (НДС) ОФ при ее заливке жидким металлом.

Проведено множество теоретических и экспериментальных исследований НДС оболочечных конструкций с различными структурами [4–9] и из разных функциональных материалов [8–12], условий нагружения [7, 13–17] и формы оболочек [18–21].

В работе [22] предложена технология изготовления многослойной оболочковой формы со слоистой структурой, в которой слои скользили бы друг относительно друга. Другое предложение состоит в том, чтобы слои ОФ были выполнены таким образом, чтобы они скользили относительно друг друга с наличием трения. Постановка задачи будет соответствовать постановке, выполненной в работе [3]. Именно этому вопросу и посвящена настоящая работа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается осесимметричное тело вращения (рис. 1, а). Деформируемый материал – форма и затвердевший металл считаются изотропными. Оболочковая форма представлена многослойным композитом толщиной T ; имеем трехкомпонентную систему (рис. 1, б): область I – жидкий металл; область II – затвердевший металл; область III – многослойная форма.

Используя линейную теорию упругости, эйлерову систему координат и уравнение теплопроводности, можно записать для каждой из областей систему уравнений:

– для области I :

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma = P_1; P_1 = -\gamma h; \dot{\theta} = \bar{\alpha}_1 \Delta \theta; \quad (1)$$

– для областей II, III :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= 0; \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p^t \varepsilon_{ij}^*; \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon \delta_{ij}; \varepsilon = \varepsilon_{ii}; \\ \varepsilon_{ii} &= 3k_p^t \sigma + 3\alpha_p^t (\theta_n - \theta_p^*); \varepsilon_{ij} = 0,5(U_{i,j} + U_{j,i}); \end{aligned}$$

$$\dot{\theta} = \bar{\alpha}_2 \Delta \theta; \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \bar{\alpha}_3 \Delta \theta \text{ (только для области III),}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; U_i – перемещения; ε_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций; σ – гидростатическое напряжение; G_p^t – модуль сдвига закристаллизовавшегося металла ($p = 2$) и оболочковой формы в слое t ($p = 3$); δ_{ij} – символ Кронекера; k_p^t – коэффициент объемного сжатия ($p = 2, 3$); α_3^t – коэффициент линейного расширения в области III в слое t ; γ – плотность разливаемого металла; $\bar{\alpha}_p$ – коэффициент температуропроводности в области $p = 1, 2$; $\bar{\alpha}_3$ – коэффициент температуропроводности в области III в слое t ; θ_n – текущая температура; θ_p^* – начальная температура в области p .

В системе (2) используется суммирование по повторяющимся индексам.

В процессе охлаждения жидкого металла при условии, что температура металла $\theta_m \leq \theta_k$ (где θ_k – температура кристаллизации), определяется толщина затвердевшего слоя из решения уравнения межфазового перехода:

$$\frac{d\theta_1}{dn_*} \lambda_1 - \frac{d\theta_2}{dn_*} \lambda_2 = \frac{d\Delta}{dt} L \rho, \quad (3)$$

где θ_1 и θ_2 – температура в твердой и жидкой фазах; λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности в соответствующих фазах; Δ – толщина корочки; L – скрытая теплота плавления; ρ – плотность твердой фазы; n_* – нормаль к границе двух фаз.

Решение уравнение (3) дает следующую зависимость для определения толщины закристаллизовавшейся корочки Δ_n на временном шаге $\Delta \tau_n$ [3]:

$$\Delta_n = C \sqrt{\tau}, \quad C = \sqrt{\frac{2\Delta\theta_1 \lambda_1}{\rho L}}; \quad (4)$$

здесь $\Delta\theta_1$ – перепад температур в твердой фазе вблизи фронта кристаллизации.

С учетом осевой симметрии имеем следующее: $\sigma_{31} = \sigma_{32} = 0$; $\varepsilon_{31} = \varepsilon_{32} = 0$; $U_3 = 0$ (рис. 1). Начальные условия задачи: $\Delta_{\tau=0} = 0$ – отсутствие твердой фазы металла; Δ – толщина слоя затвердевшего метал-

ла; $\theta_I|_{\tau=0} = \theta_0$ – температура разливаемого жидкого металла; $\theta_{III}|_{\tau=0} = \theta^*$ – начальная температура формы; $\theta_0 = 1550^\circ\text{C}$.

Граничные условия задачи (рис. 1, а):

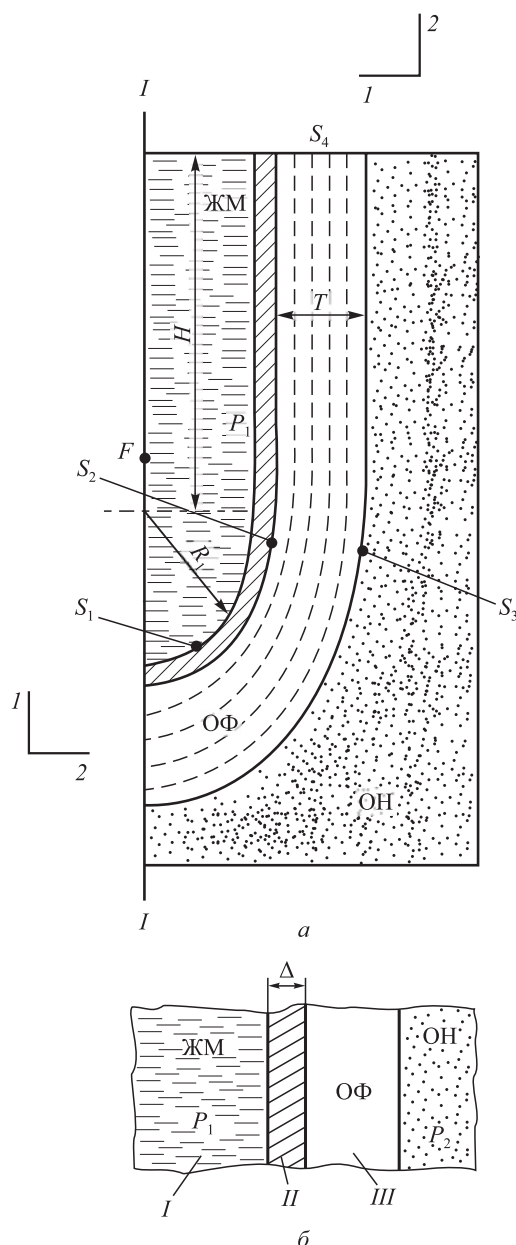


Рис. 1. Меридиональное сечение системы с учетом осевой симметрии:

а – сечение вертикальной плоскости; б – схема моделирования областей системы; I – жидкий металл (ЖМ); II – затвердевший металл; III – многослойная оболочковая форма; T – толщина оболочковой формы; H – высота цилиндрической части стояка; R_1 – радиус сферической части стояка; P_1 – гидростатическое давление жидкого металла

Fig. 1. Meridional section of the system taking into account the axial symmetry:

a – cross-section of vertical plane; б – simulation scheme of the system; I – liquid metal (ЖМ); II – hardened metal; III – layered shell mold; T – thickness of the shell mold; H – height of the riser cylindrical part; R_1 – radius of the riser spherical part; P_1 – hydrostatic pressure of the liquid metal

– на оси симметрии $U_2 = 0$; $\sigma_{21} = 0$; $q_n = 0$;
– на поверхностях S_1, S_2, S_3

$$\sigma_{11}|_{S_1} = -P_1; \sigma_{12}|_{S_1} = 0; \sigma_{21}|_{S_4} = 0; \sigma_{22}|_{S_4} = 0;$$

$$\sigma_{11}|_{S_3} = 0; \sigma_{12}|_{S_3} = -\psi\tau_s \frac{U_{\text{ск}}}{U^*} \cos(n, x_1); \quad (5)$$

$$\theta_F = \theta_0; \theta|_{S_3} = 20^\circ\text{C},$$

где ψ^* – коэффициент трения на поверхности S_3 контакта между ОФ и ОН.

На границе двух слоев при $x_1 = x_1^*$ (рис. 2) имеем

$$\sigma_{12}^*|_{x_1=x_1^*} = -\psi\tau_s \frac{U_{\text{ск}}}{U^*} \cos(n, x_1); \quad (6)$$

где $U_{\text{ск}} = U_{|a_2} - U_{|a_1}\theta$ – скольжение слоя a_2 относительно слоя a_1 вдоль координаты x_2 ; U^* – нормирующая величина U ; ψ – коэффициент трения на границе слоя в ОФ.

При этом решается контактная задача. На поверхности S_3 (рис. 1, а) примем:

$$\text{если } \sigma_{11}|_{S_3^k} > 0 \Rightarrow \sigma_{11}|_{S_3^k} = 0;$$

$$\text{если } U_{11}|_{S_3^k} < 0 \Rightarrow U_{11}|_{S_3^k} = 0,$$

где k – номер грани элемента на контактной поверхности.

Решение задачи осуществлялось численным методом [23], применяя разработанные схемы с учетом программного комплекса [24], которые были использованы также в работе [2].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследовали оболочковую форму, состоящую из десяти слоев, со следующими геометрическими параметрами: $T = 5$ мм; $H = 50$ мм; $R_1 = 20$ мм. Свойства формы:

$$G = 2960 \text{ кг/мм}^2; \alpha = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1};$$

$$\lambda = 0,000812 \text{ Вт/(мм} \cdot ^\circ\text{C)}; C = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}; \quad (7)$$

$$\gamma = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3.$$

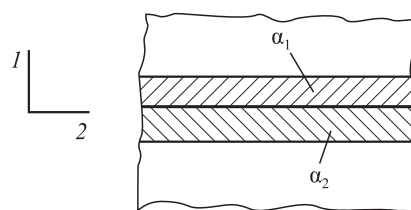


Рис. 2. Схема взаимодействия контактирующих слоев

Fig. 2. Scheme of contacting layers interaction

На рис. 3 (сплошные линии) показаны результаты решения задачи при наличии граничных условий (5), условия (6) на внутренних поверхностях слоев ОФ при $\psi = 0,002$. Эпюры напряжений σ_{11} , σ_{22} в ОФ приведены на рис. 3, а. Наблюдаем полное изменение σ_{22} по сечению ОФ в сравнении с расчетом [3] (рис. 3, а), где $\psi = 0$. Характер поведения величины σ_{11} остался тот же [3]. Такое же поведение по перемещениям U_1 , U_2 . Напряжение σ_{12} на внутренних слоях ОФ $\sigma_{12} < 0,03$ МПа, на поверхности контакта с ОН $\sigma_{12} \approx 0,03$ МПа.

Видим, что наличие небольшой величины трения между слоями ОФ радикально изменило НДС ОФ, и она уже может выдержать заливку жидкой стали. Посмотрим, как будет влиять на НДС ОФ увеличение трения на ОН (поверхность S_3). Зададим $\psi^* = 1$. Результаты расчета приведены на рис. 3 (штриховые линии).

Внутри напряжения σ_{12} достигают 0,34 МПа, на поверхности S_3 напряжения трения – 0,08 МПа. По всем параметрам напряжения σ_{11} , σ_{22} уменьшились. Оболочковая форма по заданным граничным параметрам более устойчива к трещинообразованию, чем при наличии коэффициента трения на поверхности S_3 при $\psi^* = 0,01$.

На рис. 4 приведены результаты расчета при $\psi^* = 10$ (сплошные линии) и $\psi^* = 20$ (штриховые линии).

Как следует из рис. 3 и 4, с увеличением трения ОФ по поверхности ОН растягивающие напряжения σ_{22}

уменьшаются на наружной поверхности ОФ и несколько возрастают в срединной ее части.

Сжимающие напряжения увеличиваются по абсолютной величине на внутренней поверхности ОФ. Перемещения U_1 , U_2 уменьшаются как в сечении ОФ, так и на ее поверхностях.

Эти эпюры мало чем отличаются от эпюр, представленных на рис. 4, при $\psi^* = 20$, а эпюры при $\psi^* = 40$ и $\psi^* = 80$ практически сливаются, то есть наблюдается насыщение и дальнейшее увеличение параметра ψ^* на поверхности S_3 не имеет смысла. Наибольшие растягивающие напряжения σ_{22} в центральной по сечению области ОФ, и они уменьшаются от оси симметрии к цилиндрической части ОФ. С увеличением трения на поверхности S_3 зона отставания ОФ от ОН уменьшается и при $\psi^* = 40$ и $\psi^* = 80$ исчезает, то есть вся поверхность S_3 формы соприкасается с ОН. На рис. 5 приведены графики изменения наибольшего по абсолютной величине напряжения σ_{22} в различных точках сечения ОФ: 1 – на внутренней поверхности; 2 – в средней области ОФ; 3 – на наружной, в зависимости от коэффициента трения ψ^* .

Видим, что напряжение σ_{22} стабилизируется уже при $\psi^* = 10$. На внутренней поверхности ОФ растягивающие напряжения σ_{22} с увеличением трения на поверхности S_3 уменьшаются до нулевых значений. Это объясняется тем, что трение препятствует перемещению наружного слоя от его линейного расширения и, таким образом,

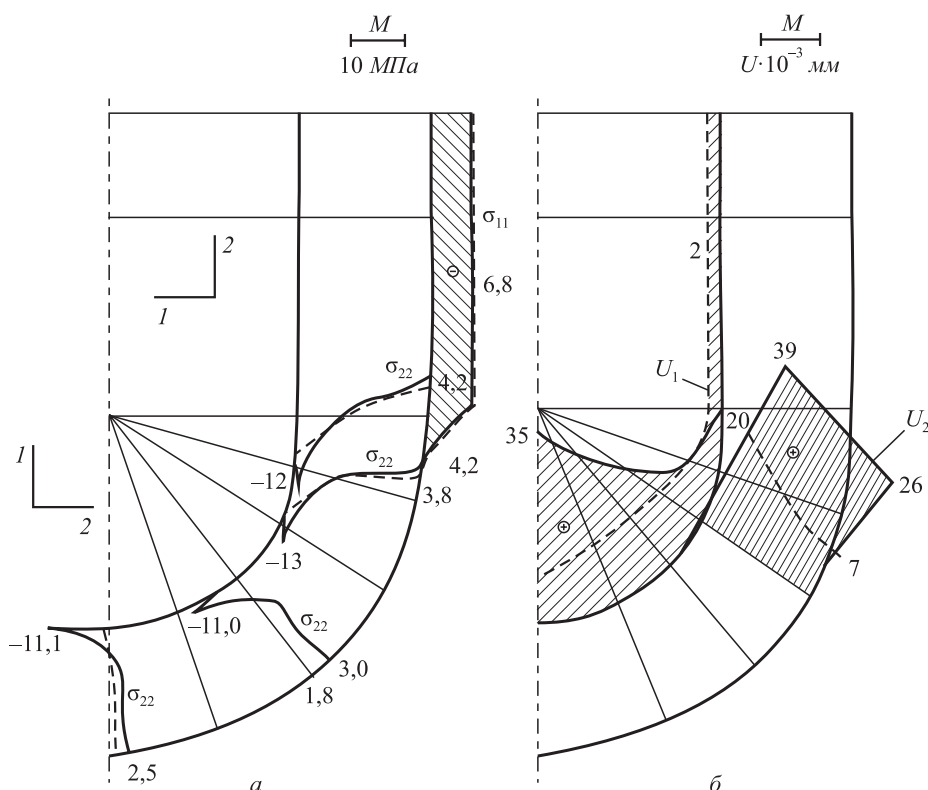


Рис. 3. Поля напряжений σ_{11} , σ_{22} (а) и перемещений U_1 , U_2 (б) при $\psi = 0,002$ (—) и при $\psi = 1$ (---)

Fig. 3. Stress fields σ_{11} , σ_{22} (a) and displacements U_1 , U_2 (b) at $\psi = 0.002$ (—) and at $\psi = 1$ (---)

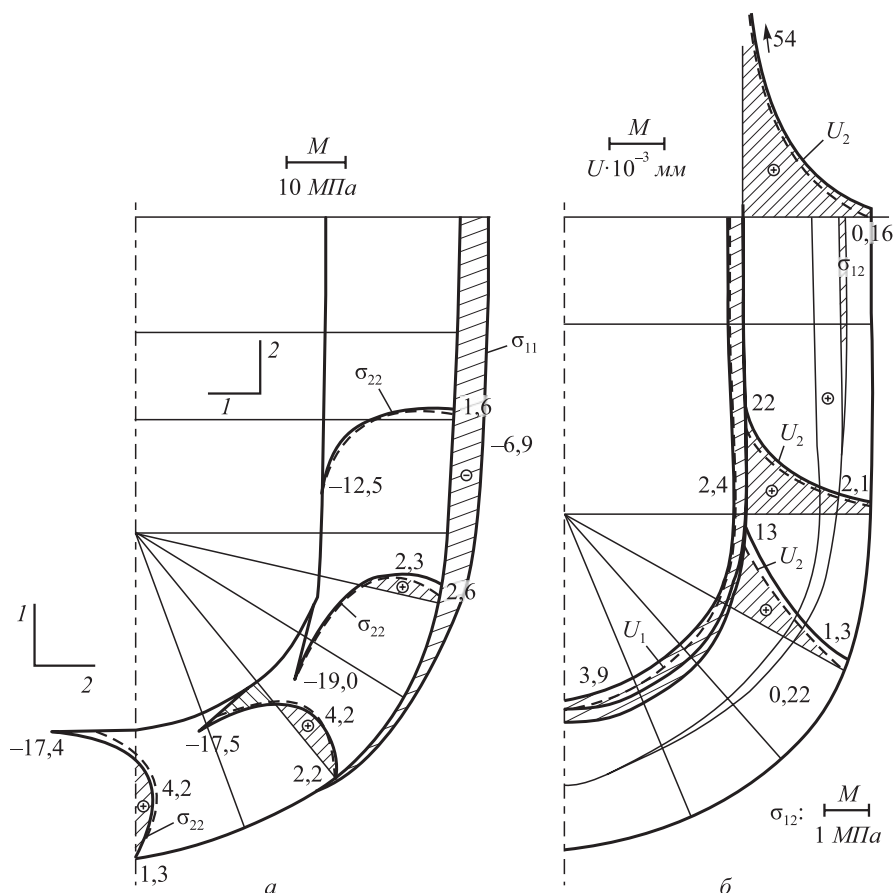


Рис. 4. Поля напряжений σ_{11} , σ_{22} (а) и перемещений U_1 , U_2 (б) при $\psi = 10$ (—) и при $\psi = 20$ (---)

Fig. 4. Stress fields σ_{11} , σ_{22} (a) and displacements U_1 , U_2 (b) at $\psi = 10$ (—) and at $\psi = 20$ (---)

уменьшает значение растягивающих напряжений, вызванных расширением внутренних слоев ОФ.

Трение ОФ и ОН положительно влияет на повышение трещиностойкости ОФ. Продолжим исследование, принимая $\psi^* = 10$ (на поверхности S_3). Увеличим трение во внутренних слоях ОФ. На рис. 6 представлены результаты задачи при $\psi = 0,006$ (сплошные линии), $\psi = 0,01$ (штриховые линии).

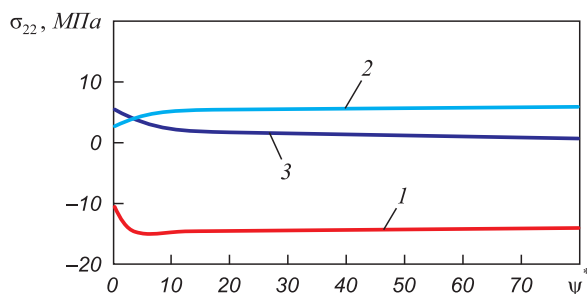


Рис. 5. Изменения напряжений σ_{22} по толщине оболочковой формы в зависимости от ψ^* :

1 – облицовочный слой; 2 – внутренний (промежуточный) слой; 3 – наружный слой

Fig. 5. Changes in stresses σ_{22} in the thickness of shell mold depending on ψ^* :

1 – facing layer; 2 – inner (intermediate) layer; 3 – outer layer

Наблюдаем увеличение растягивающих и сжимающих (по абсолютной величине) напряжений σ_{22} , особенно при $\psi = 0,01$ (штриховые линии). Касательные напряжения σ_{12} и перемещения U_2 приведены на рис. 6, б. Наружная поверхность ОФ полностью лежит на ОН.

Следовательно, наличие трения между слоями ОФ способствует уменьшению трещиностойкости до определенного предела (рис. 3 – 5), а затем ведет к ее увеличению (рис. 6). Все это справедливо при открытой поверхности S_4 (рис. 1).

Представим поверхность S_4 ОФ в виде $S_4 = S'_4 + S''_4$:

$$U_2|_{S'_4} = 0; \quad \sigma_{21}|_{S'_4} = 0; \quad \sigma_{22}|_{S'_4} = 0. \quad (9)$$

где S''_4 – закрытая поверхность; S'_4 – свободная поверхность.

Выполним расчет с граничными условиями как в предыдущем случае (при $\psi = 0,006$), а на поверхности S_4 примем граничное условие (9).

На рис. 7, а приведены результаты решения задачи при $S'_4 = 3$ мм. Видим, что растягивающие напряжения σ_{22} полностью отсутствуют, сжимающие напряжения σ_{22} в сечениях ОФ тоже меньше, чем в предыдущем случае (рис. 6). Напряжения σ_{22} на поверхности S'_4 очень

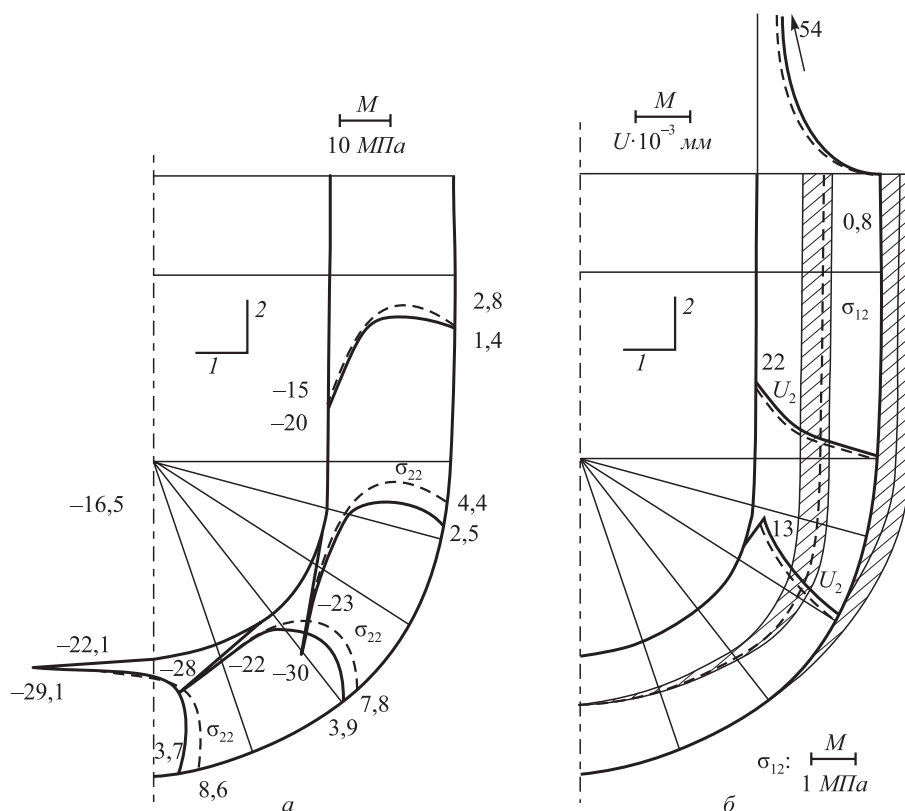


Рис. 6. Поля напряжений σ_{11} , σ_{22} (а) и перемещений U_1 , U_2 (б) при $\psi = 0,006$ (—) и при $\psi = 0,01$ (---)

Fig. 6. Fields of stresses σ_{11} , σ_{22} (a) and displacements U_1 , U_2 (b) at $\psi = 0.006$ (—) and at $\psi = 0.01$ (---)

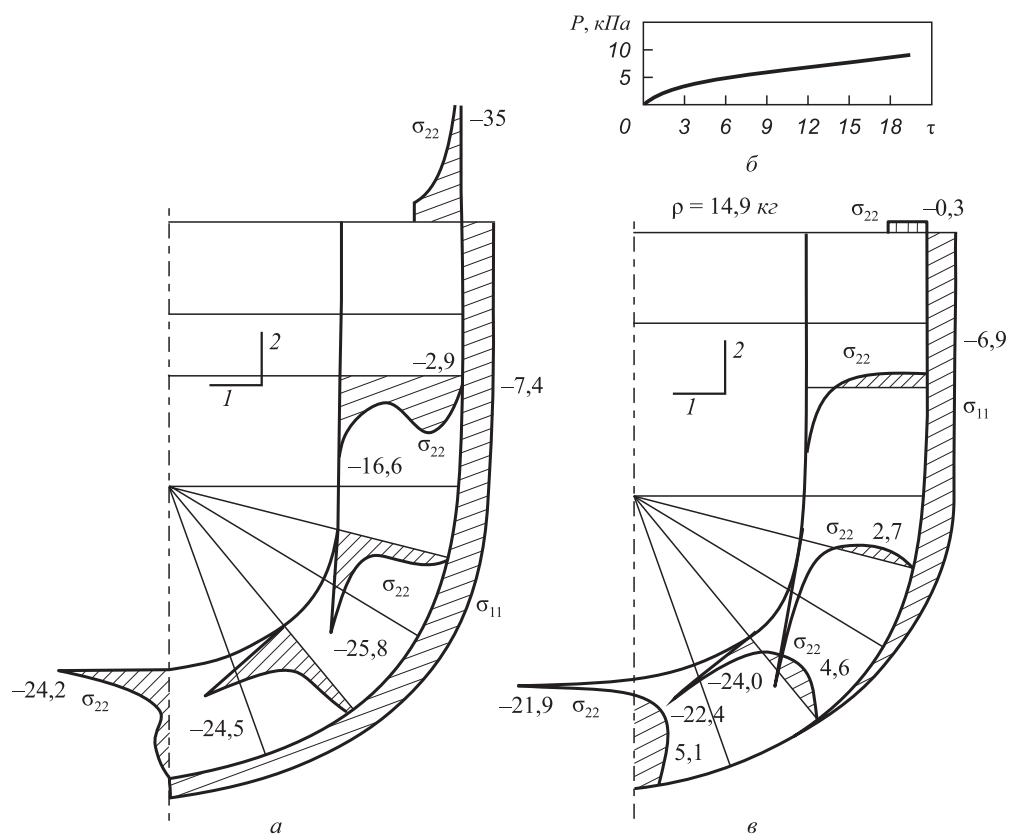


Рис. 7. Поля напряжений σ_{11} , σ_{22} (а, б) и кривая давления P (б) на поверхность S_4''

Fig. 7. Fields of stresses σ_{11} , σ_{22} (a, б) and curve of pressure P (б) on the surface S_4''

большие (рис. 7, а). На рис. 7, б приведена кривая давления P на поверхности S_4'' . Давление на поверхности S_4'' через 18,65 с, охлаждение ОФ составляет 8590 Па, что, безусловно, приведет к разрушению ОФ.

Попробуем приложить на поверхность S_4'' равномерную нагрузку $\sigma_{22} = -0,3$ МПа, что соответствует $P = 250$ Па. На рис. 7, в приведены результаты решения задачи. Видим, что при значительной нагрузке P (250 Па при $S_4'' = 3$ мм) напряжения σ_{22} примерно такие же, как и при свободной поверхности S_4 . То есть закрывать поверхность S_4 не имеет смысла.

Выводы

Разработана и запрограммирована математическая модель охлаждения многослойной ОФ, позволяющая

изменять свойства любого слоя, его поведение относительно других слоев, внешние условия, действующие на охлаждаемую форму: ферростатическое давление, трение на контакте ОФ с ОН (решение контактной задачи), прижим на верхней поверхности ОФ.

В результате проведенного теоретического исследования показано, что отсутствие трения между слоями ОФ ведет к ее разрушению. Наличие даже небольшого трения между слоями положительно влияет на трещиностойкость многослойной ОФ.

При охлаждении ОФ в ОН величина трения между ОФ и ОН существенно влияет на напряженно-деформированное состояние ОФ. Чем больше трение, тем ОФ более устойчива к трещинообразованию.

Поверхность S_4 ОФ должна быть свободной, закрытие ее ведет к разрушению ОФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Математическое моделирование процессов получения отливок в керамические оболочковые формы / В.И. Одинок, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев, А.В. Свиридов. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 224 с.
2. Одинок В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Свиридов А.В., Иванкова Е.П. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и морфологического строения структуры оболочковых форм по выплавляемым моделям // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 742–754. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-9-742-754>
3. Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А. Влияние внутреннего фактора на трещиностойкость оболочковой формы по выплавляемым моделям // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 137–144. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-137-144>
4. Kulikov G.M. Influence of anisotropy on the stress state of multilayer reinforced shells // Soviet Applied Mechanics. 1987. Vol. 22. No. 12. P. 1166–1170.
5. Zveryaev E.M., Berlinov M.V., Berlinova M.N. The integral method of definition of basic tension condition anisotropic shell // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 8. P. 5811–5816.
6. Maximyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Stress state of flexible composite shells with reinforced holes // International Applied Mechanics. 2014. Vol. 50. No. 5. P. 558–565. <https://doi.org/10.1007/s10778-014-0654-6>
7. Vetrov O.S., Shevchenko V.P. Study of the stress-strain state of orthotropic shells under the action of dynamical impulse loads // Journal of Mathematical Sciences. 2012. Vol. 183. No. 2. P. 231–240. <https://doi.org/10.1007/s10958-012-0809-0>
8. Vasilenko A.T., Urusova G.P. The stress state of anisotropic conic shells with thickness varying in two directions // International Applied Mechanics. 2000. Vol. 35. No. 5. P. 631–638. <https://doi.org/10.1007/BF02682077>
9. Tovstik P.E., Tovstik T.P. Two-dimensional linear model of elastic shell accounting for general anisotropy of material // Acta Mechanica. 2014. Vol. 225. No. 3. P. 647–661. <https://doi.org/10.1007/s00707-013-0986-z>
10. Grigorenko Y.M., Vasilenko A.T., Pankratova N.D. Stress state and deformability of composite shells in the three-dimensional statement // Mechanics of Composite Materials. 1985. Vol. 20. No. 4. P. 468–474. <https://doi.org/10.1007/BF00609648>
11. Vasilenko A.T., Sudavtsova G.K. The stress state of stiffened shallow orthotropic shells // International Applied Mechanics. 2001. Vol. 37. No. 2. P. 251–262. <https://doi.org/10.1023/A:1011393724113>
1. Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Sviridov A.V. *Mathematical Modeling of Processes of Castings Production into Ceramic Shell Molds*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2020, 224 p. (In Russ.).
2. Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Sviridov A.V., Ivankova E.P. Choice of materials properties and structure of shell molds by investment models. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 742–754. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-9-742-754>
3. Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A. Influence of internal factor on crack resistance of shell mold by investment models. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 137–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-137-144>
4. Kulikov G.M. Influence of anisotropy on the stress state of multilayer reinforced shells. *Soviet Applied Mechanics*. 1987, vol. 22, no. 12, pp. 1166–1170.
5. Zveryaev E.M., Berlinov M.V., Berlinova M.N. The integral method of definition of basic tension condition anisotropic shell. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 8, pp. 5811–5816.
6. Maximyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Stress state of flexible composite shells with reinforced holes. *International Applied Mechanics*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 558–565. <https://doi.org/10.1007/s10778-014-0654-6>
7. Vetrov O.S., Shevchenko V.P. Study of the stress-strain state of orthotropic shells under the action of dynamical impulse loads. *Journal of Mathematical Sciences*. 2012, vol. 183, no. 2, pp. 231–240. <https://doi.org/10.1007/s10958-012-0809-0>
8. Vasilenko A.T., Urusova G.P. The stress state of anisotropic conic shells with thickness varying in two directions. *International Applied Mechanics*. 2000, vol. 35, no. 5, pp. 631–638. <https://doi.org/10.1007/BF02682077>
9. Tovstik P.E., Tovstik T.P. Two-dimensional linear model of elastic shell accounting for general anisotropy of material. *Acta Mechanica*. 2014, vol. 225, no. 3, pp. 647–661. <https://doi.org/10.1007/s00707-013-0986-z>
10. Grigorenko Y.M., Vasilenko A.T., Pankratova N.D. Stress state and deformability of composite shells in the three-dimensional statement. *Mechanics of Composite Materials*. 1985, vol. 20, no. 4, pp. 468–474. <https://doi.org/10.1007/BF00609648>
11. Vasilenko A.T., Sudavtsova G.K. The stress state of stiffened shallow orthotropic shells. *International Applied Mechanics*. 2001, vol. 37, no. 2, pp. 251–262. <https://doi.org/10.1023/A:1011393724113>

12. Nemish Yu.N., Zirka A.I., Chernopiskii D.I. Theoretical and experimental investigations of the stress-strain state of nonthin cylindrical shells with rectangular holes // *International Applied Mechanics*. 2000. Vol. 36. No. 12. P. 1620–1625.
13. Rogacheva N.N. The effect of surface stresses on the stress-strain state of shells // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016. Vol. 80. No. 2. P. 173–181.
<https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.06.011>
14. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Makeev E.V. On the stress state of shells penetrating into a deformable solid // *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. No. 6. P. 698–703.
<https://doi.org/10.3103/S0025654415060102>
15. Krasovsky V.L., Lykhachova O.V., Bessmertnyi Ya.O. Deformation and stability of thin-walled shallow shells in the case of periodically non-uniform stress-strain state. In: *Proc. of the 11th Int. Conference «Shell Structures: Theory and Applications»*. 2018. Vol. 4. P. 251–254.
16. Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S., Kharenko S.B. Elastoplastic deformation of conical shells with two circular holes // *International Applied Mechanics*. 2012. Vol. 48. No. 3. P. 343–348.
<https://doi.org/10.1007/s10778-012-0525-y>
17. Ivanov V.N., Imomnazarov T.S., Farhan I.T.F., Tiekolo D. Analysis of stress-strain state of multi-wave shell on parabolic trapezoidal plan // *Advanced Structured Materials*. 2020. Vol. 113. P. 257–262.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-20801-1_19
18. Gerasimenko P.V., Khodakovskiy V.A. Numerical algorithm for investigating the stress-strain state of cylindrical shells of railway tanks // *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*. 2019. Vol. 52. No. 2. P. 207–213.
19. Meish V.F., Maiborodina N.V. Stress state of discretely stiffened ellipsoidal shells under a nonstationary normal load // *International Applied Mechanics*. 2018. Vol. 54. No. 6. P. 675–686.
<https://doi.org/10.1007/s10778-018-0922-y>
20. Marchuk A.V., Gnidashev S.V. Analysis of the effect of local loads on thick-walled cylindrical shells with different boundary conditions // *International Applied Mechanics*. 2016. Vol. 52. No. 4. P. 368–377.
<https://doi.org/10.1007/s10778-016-0761-7>
21. Grigorenko Ya.M., Grigorenko A.Ya., Zakhariichenko L.I. Analysis of influence of the geometrical parameters of elliptic cylindrical shells with variable thickness on their stress-strain state // *International Applied Mechanics*. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 155–162.
<https://doi.org/10.1007/s10778-018-0867-1>
22. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
23. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокое, Б.Г. Каплунов, А.В. Песков, А.В. Баков. М.: Наука, 2008. 176 с.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661389. / В.И. Одинокое, А.Н. Прокудин, А.М. Сергеева, Г.М. Севастьянов. ОДИССЕЙ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.
12. Nemish Yu.N., Zirka A.I., Chernopiskii D.I. Theoretical and experimental investigations of the stress-strain state of nonthin cylindrical shells with rectangular holes. *International Applied Mechanics*. 2000, vol. 36, no. 12, pp. 1620–1625.
13. Rogacheva N.N. The effect of surface stresses on the stress-strain state of shells. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016, vol. 80, no. 2, pp. 173–181.
<https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.06.011>
14. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Makeev E.V. On the stress state of shells penetrating into a deformable solid. *Mechanics of Solids*. 2015, vol. 50, no. 6, pp. 698–703.
<https://doi.org/10.3103/S0025654415060102>
15. Krasovsky V.L., Lykhachova O.V., Bessmertnyi Ya.O. Deformation and stability of thin-walled shallow shells in the case of periodically non-uniform stress-strain state. In: *Proc. of the 11th Int. Conference «Shell Structures: Theory and Applications»*. 2018, vol. 4, pp. 251–254.
16. Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S., Kharenko S.B. Elastoplastic deformation of conical shells with two circular holes. *International Applied Mechanics*. 2012, vol. 48, no. 3, pp. 343–348.
<https://doi.org/10.1007/s10778-012-0525-y>
17. Ivanov V.N., Imomnazarov T.S., Farhan I.T.F., Tiekolo D. Analysis of stress-strain state of multi-wave shell on parabolic trapezoidal plan. *Advanced Structured Materials*. 2020, vol. 113, pp. 257–262.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-20801-1_19
18. Gerasimenko P.V., Khodakovskiy V.A. Numerical algorithm for investigating the stress-strain state of cylindrical shells of railway tanks. *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*. 2019, vol. 52, no. 2, pp. 207–213.
19. Meish V.F., Maiborodina N.V. Stress state of discretely stiffened ellipsoidal shells under a nonstationary normal load. *International Applied Mechanics*. 2018, vol. 54, no. 6, pp. 675–686.
<https://doi.org/10.1007/s10778-018-0922-y>
20. Marchuk A.V., Gnidashev S.V. Analysis of the effect of local loads on thick-walled cylindrical shells with different boundary conditions. *International Applied Mechanics*. 2016, vol. 52, no. 4, pp. 368–377.
<https://doi.org/10.1007/s10778-016-0761-7>
21. Grigorenko Ya.M., Grigorenko A.Ya., Zakhariichenko L.I. Analysis of influence of the geometrical parameters of elliptic cylindrical shells with variable thickness on their stress-strain state. *International Applied Mechanics*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 155–162.
<https://doi.org/10.1007/s10778-018-0867-1>
22. Repyakh S.I. *Technological Basics of Casting by Investment Models*. Dnepropetrovsk: Lira, 2008, 1056 p.
23. Odinokov V.I., Kaplunov B.G., Peskov A.V., Bakov A.V. *Mathematic Modeling of Complex Technological Processes*. Moscow: Nauka, 2008, 176 p. (In Russ.).
24. Odinokov V.I., Prokudin A.N., Sergeeva A.M., Sevast'yanov G.M. ODYSSEUS. Certificate of state registration of the computer program no. 2012661389. Registered in the Register of Computer Programs on 13.12.2012. (In Russ.).

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: 0000-0003-0200-1675
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: 0000-0003-0200-1675
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

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

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

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

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

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

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

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

Д. В. Чернышова – проведение расчетов, подготовка библиографического списка, обработка графического материала.

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

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

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

E. A. Dmitriev – calculations, their analysis, preparation and correction of the text.

D. V. Chernyshova – calculations, references preparation, graphic material processing.

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

Поступила в редакцию 10.06.2021

После доработки 20.09.2021

Принята к публикации 01.10.2021

Received 10.06.2021

Revised 20.09.2021

Accepted 01.10.2021