

УДК 621.039.5

Численное моделирование эффективного турбулентного теплопереноса при поперечном обтекании пучка стержней^{*}

**М.В. Баясхаланов¹, И.Г. Меринов¹, М.И. Писаревский¹,
В.С. Харитонов¹, А.Е. Аксенова², В.А. Первичко², В.В. Чуданов²**

¹*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва*

²*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Москва*

E-mails: MVBayaskhalanov@mephi.ru, chud@ibrae.ac.ru

В работе представлены результаты исследования, выполненного с помощью кода CONV-3D на основе DNS-подхода, эффективного турбулентного теплопереноса вдоль пучка стержней при поперечном обтекании последнего. Для определения эффективного коэффициента теплопроводности проводилось моделирование процесса смешения в рабочем участке двух плоских параллельных потоков теплоносителя, двигающихся с одинаковыми скоростями и имеющих разные температуры на входе. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными для воды подтвердило возможность использования численного моделирования вместо проведения реальных экспериментов. Такая замена реального эксперимента его вычислительным аналогом является актуальной в случае исследования жидкокометаллических теплоносителей.

Ключевые слова: быстрые реакторы, жидкокометаллические теплоносители, модель анизотропного пористого тела, DNS-моделирование, сравнение с экспериментальными данными, коэффициент эффективной теплопроводности.

Введение

При моделировании в приближении анизотропного пористого тела [1–3] трехмерного тепломассопереноса в активных зонах быстрых реакторов с жидкокометаллическим теплоносителем и бесчехловыми тепловыделяющими сборками (ТВС) необходима в том числе информация о турбулентном теплопереносе в зависимости от угла обтекания сборки ТВЭлов. Для определения компонент матрицы эффективной теплопроводности для модели анизотропного пористого тела [1] требуются данные о турбулентном поперечном теплопереносе при продольном обтекании сборки, а также о турбулентном

* Работа выполнена при финансовой поддержке госкорпорации «Росатом» (в рамках государственного контракта № Н.40.241.19.21.1068 от 14.04.2021 г.).

теплопереносе вдоль стержней при их поперечном обтекании. Подобные данные также необходимы и при моделировании тепломассопереноса в активных зонах с помощью ячейковых кодов.

Вопрос межканального поперечного тепломассопереноса при продольном обтекании пучков стержней достаточно хорошо изучен [4–7]. В работе [4] была предложена формула для расчета турбулентной составляющей межканального теплообмена. В то же время достоверная информация о величине коэффициента эффективной турбулентной теплопроводности в направлении вдоль стержней при поперечном обтекании, важная при моделировании тепломассопереноса в активных зонах в условиях блокировки части проходного сечения сборок и в некоторых других ситуациях, ограничена экспериментами, выполненными на воде [8, 9].

Реализация предложенной в работе [9] методики определения эффективной турбулентной теплопроводности путем смешения параллельных потоков с разной температурой в экспериментах на жидком металле сопряжена с большими трудностями, которые связаны с высоким уровнем температуры жидкого металла и необходимостью выбора специальных конструкционных материалов рабочего участка.

В настоящей работе представлены результаты вычислительного эксперимента на основе метода смешения потоков [9] с использованием кода CONV-3D на основе подхода DNS (Direct Numerical Simulation) [10, 11], проведенного с целью определения эффективной турбулентной теплопроводности в направлении вдоль стержней при поперечном обтекании сборки потоком свинца. Основная задача состояла в оценке возможности использования численного эксперимента для определения эффективной турбулентной теплопроводности в стержневой сборке.

Постановка задачи и расчетная модель

Постановка задачи по моделированию с помощью кода CONV-3D эффективного турбулентного теплопереноса в сборке гладких стержней в поперечном к движению потока направлении определялась условиями реализации в численном эксперименте метода смешения потоков [9].

На рис. 1 показана схема рабочего участка, использованного в работе [9] для измерения эффективной теплопроводности в параллельном к оси стержней направлении методом смешения потоков с разной температурой. Рассмотренная в работе [9] методика предназначена для определения используемого в модели пористого тела и в ячейковых кодах коэффициента эффективной теплопроводности вдоль пучка стержней при его поперечном обтекании. Величина этого коэффициента зависит от относительного шага решетки стержней, ее пористости по теплоносителю (являющейся функцией относительного шага и типа упаковки стержней), молекулярной теплопроводности теплоносителя, чисел Рейнольдса и Прандтля.

При одинаковой скорости потоков теплоперенос вдоль стержней на участке смешения $L_{\text{см}}$ (в области отсутствия перегородки) осуществляется за счет эффективной теплопроводности теплоносителя, что

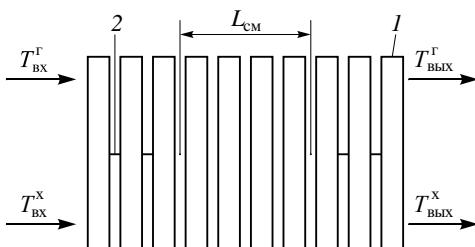


Рис. 1. Схема рабочего участка для измерения эффективной теплопроводности в параллельном к оси стержней направлении.

1 — стержни круглого сечения,
2 — разделительная перегородка.

Рис. 2. Зависимость параметра теплопереноса k от относительного изменения температуры горячего канала θ .

приводит к изменению температуры потоков на выходе рабочего участка. В приближении модели пористой среды можно получить выражение, связывающее относительное изменение температуры горячего канала

$$\theta = \frac{T_{\text{вх}}^{\Gamma} - T_{\text{вых}}^{\Gamma}}{T_{\text{вх}}^{\Gamma} - T_{\text{вх}}^x} \text{ с параметром теплопереноса } k,$$

зависящим от теплофизических и геометрических характеристик потока [9]:

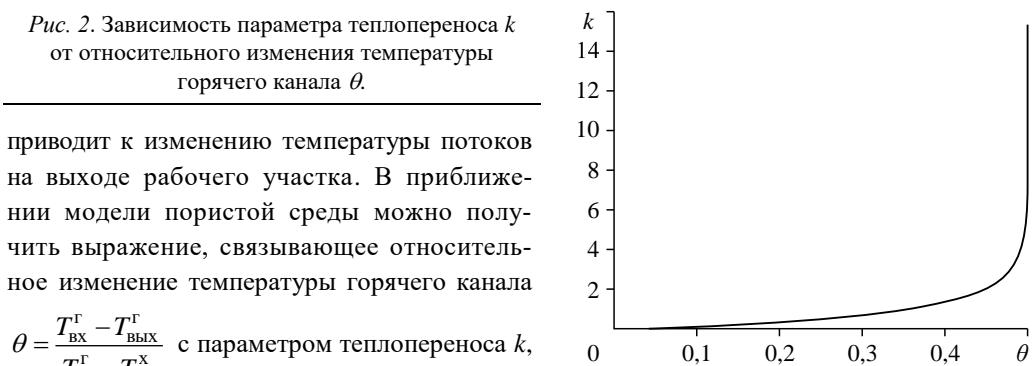
$$\theta = \frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp(-k(2n+1)^2)}{(2n+1)^2},$$

здесь $k = \frac{\pi^2 L_{\text{см}} \lambda_{\text{eff}}}{h^2 \rho c_p u}$, $L_{\text{см}}$ — длина участка смешения потоков, h — высота участка смешения, λ_{eff} — коэффициент эффективной теплопроводности вдоль сборки стержней при ее поперечном обтекании. Вид зависимости $k(\theta)$ показан на рис. 2.

В условиях отсутствия тепловых потерь и одинаковой теплоемкости потоков жидкости при изменении длины смешения $L_{\text{см}}$ (соответственно параметра k) от нуля до бесконечности величина θ изменяется в пределах от 0 до 0,5. Значение $\theta = 0,5$ соответствует полному выравниванию температур потоков. Таким образом, по полученному в эксперименте или расчете значению величины θ по графику на рис. 2 определяется параметр теплопереноса k . Затем по величине k рассчитывается коэффициент эффективной теплопроводности λ_{eff} вдоль сборки стержней при ее поперечном обтекании. При моделировании использовались размеры экспериментальной стержневой сборки из работы [9] (см. табл. 1).

Таблица 1
Характеристики рабочего участка

Параметр	Значение	
Диаметр стержней, мм	9,1	
Относительный шаг стержней в сборке	1,4	
Высота стержней (в зоне смешения), мм	6	
Высота стержней (в зоне разделения потоков), мм	2,5	
Общее число рядов стержней	Шахматная упаковка	13
	Коридорная упаковка	12
Число рядов стержней	На входном участке	5
	На выходном участке	4
Ширина экспериментального канала со сборкой стержней, мм	51	
Длина входного участка до области смешения, мм	Шахматная упаковка	62,5
	Коридорная упаковка	70,8
Длина области смешения, мм	39	
Общая длина рабочего участка, мм	173	



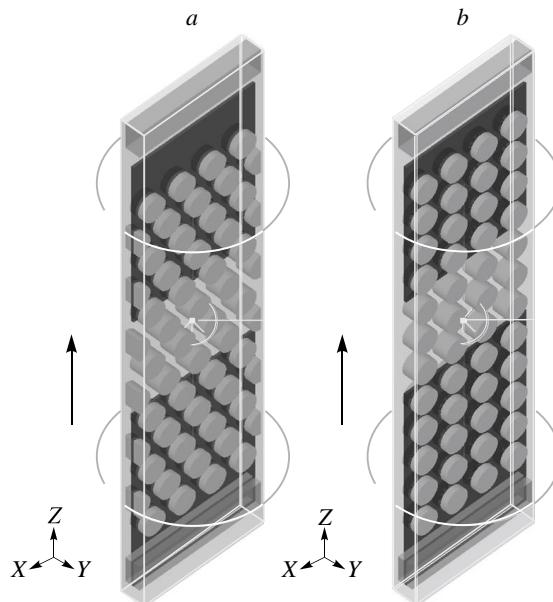


Рис. 3. Геометрия расчетной области при шахматной упаковке стержней (а) и при коридорной упаковке стержней (б).

Геометрия расчетной области для шахматной и коридорной упаковки стержней приведена на рис. 3а и 3б соответственно. Потоки «горячего» и «холодного» теплоносителей поступают в рабочий участок через входное сечение в плоскости xy при $z = 0$. Каналы для этих теплоносителей формируются перегородкой в плоскости xz толщиной 1 мм, расположенной по центру в направлении оси y . В области смешения перегородка отсутствует. На рис. 3 светлым фоном выделена зона смешения.

В экспериментах расходы горячего ($Re = 10^4 - 4 \cdot 10^5$) и холодного ($Re = 4,3 \cdot 10^3 - 1,7 \cdot 10^5$) теплоносителей соответствовали турбулентному потоку. Поскольку при попечном обтекании сборки поток проходит через участки с большими и меньшими значениями проходного сечения, число Рейнольдса определялось по средней скорости потока в узком сечении сборки, а также по диаметру стержней. В программе CONV-3D использовались источники объемного расхода с хонейкомбом с квадратной ячейкой 2,54 см (толщина стенки турбулизатора — 0,2 см, высота — 15,2 см), позволяющим создавать турбулентный поток путем генерации синтетической турбулентности во входном сечении расчетной области аналогично рекомендованному в работе [12]. На входе в каналы задавалось два источника с одинаковыми положительными расходами жидкости, но разными температурами, а на выходе — один источник с суммарным отрицательным расходом. На боковых поверхностях расчетной области и на поверхностях стержней задавались условия прилипания и непротекания для жидкости и условие нулевого теплового потока.

С учетом точности измерений в моделируемых экспериментах (около 20 %) расчеты проводились на относительно грубых сетках в так называемом квази-DNS (QDNS) приближении [13]. Для проведения численных экспериментов с целью анализа сеточной сходимости использовались две расчетные равномерные декартовы сетки: сетка № 1 — $129 \times 33 \times 513$ узлов, сетка № 2 — $257 \times 65 \times 1025$ узлов. Было установлено, что на рассмотренных сетках погрешность расчета средних температур потоков не превышает погрешности эксперимента.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для воды

Для проверки численной реализации метода смешения потоков было выполнено сопоставление результатов расчета тепломассопереноса в стержневой сборке рабочего участка с экспериментальными данными для воды. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными выполнялось по величине относительного изменения температуры горячего канала θ . При этом в качестве средней температуры горячего канала на выходе использовалось осредненное в поперечном сечении за последним рядом стержней значение температуры.

Зависимость расчетного относительного изменения температуры горячего канала от соответствующего экспериментального значения показана на рис. 4. Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальным значением, что подтверждается величиной относительной погрешности расчета θ , которая определялась как относительное отклонение расчетного значения θ_{calc} от экспериментального θ_{exp} по формуле $\theta_{\text{calc}} = (\theta_{\text{calc}} - \theta_{\text{exp}}) / \theta_{\text{exp}}$. Изменение относительной погрешности расчета величины θ от расхода воды в канале приведено в табл. 2. Максимальная погрешность расчета не превышает 11 и 10 % на сетках № 1 и № 2 соответственно.

На рис. 5 представлены результаты сравнения зависимостей коэффициента эффективной теплопроводности, вычисленного по DNS-результатам настоящей работы и по данным экспериментов [9], от числа Рейнольдса, определяемого при средней температуре

Таблица 2
Изменение относительной погрешности определения величины θ от расхода воды в канале

Расход, м ³ /ч	Погрешность, %	
	Сетка 1	Сетка 2
0,082	-11	10
0,139	-7	7
0,200	-10	7

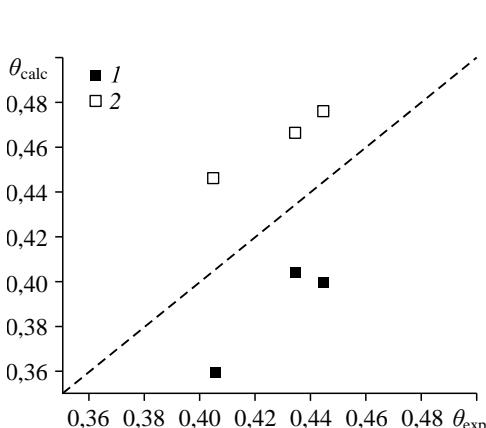


Рис. 4. Зависимость расчетного относительного изменения температуры горячего канала от соответствующего экспериментального значения.
1 — расчет на сетке № 1, 2 — расчет на сетке № 2.

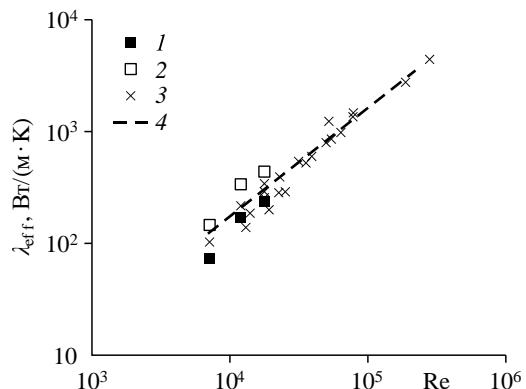


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективной теплопроводности вдоль сборки стержней при ее поперечном обтекании водой от числа Рейнольдса Re.

1 — расчет на сетке № 1, 2 — расчет на сетке № 2,
3 — экспериментальные данные, 4 — зависимость, аппроксимирующая экспериментальные данные.

в каналах. Получено хорошее согласование результатов расчета коэффициента эффективной турбулентной теплопроводности с его экспериментальными значениями. Это свидетельствует о возможности применения численного моделирования с использованием DNS-подхода вместо проведения реальных экспериментов.

Результаты расчета эффективного турбулентного теплопереноса при поперечном обтекании пучка стержней свинцом

Поскольку наибольшее распространение в отечественном реакторостроении получили тепловыделяющие сборки с шахматной компоновкой ТВЭЛов, то для расчетов со свинцовыми теплоносителем была выбрана геометрия сборки с шахматной компоновкой стержней. При этом использовались размеры расчетной области и расчетные сетки такие же, что и в случае моделирования обтекания экспериментальной сборки водой.

В связи с имеющимся существенным отличием величины вязкости воды и жидкого свинца расход свинца при моделировании задавался меньшим, чем в случае экспериментов с водой, чтобы обеспечить интервал значений числа Рейнольдса, попадающий в экспериментальный диапазон. Рассчитывалось поперечное обтекание модельной стержневой сборки параллельными потоками горячего и холодного свинца, температуры которых принимались равными 773 и 733 К соответственно.

На рис. 6 представлены расчетные значения коэффициента эффективной теплопроводности вдоль сборки стержней, полученные в результате DNS-моделирования поперечного обтекания сборки. Для сравнения здесь также приведены экспериментальные значения коэффициента эффективной теплопроводности для воды в сборке с шахматной упаковкой стержней.

Расчетные данные для свинца и экспериментальные данные для воды могут быть обобщены с помощью зависимости эффективной теплопроводности от чисел Рейнольдса и Прандтля, построенной в соответствии с рекомендациями работы [9]:

$$\lambda_{\text{eff}} = C \lambda_{\text{mol}} (x-1) \varphi \text{Re} \text{Pr}, \quad (1)$$

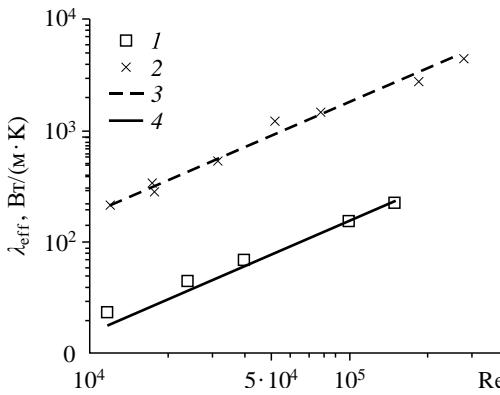


Рис. 6. Зависимость коэффициента эффективной теплопроводности вдоль сборки стержней при ее поперечном обтекании от числа Рейнольдса.

- 1 — расчет для свинца на сетке № 2,
- 2 — экспериментальные данные для воды,
- 3 — зависимость, аппроксимирующая экспериментальные данные для воды,
- 4 — зависимость, аппроксимирующая расчетные данные для свинца.

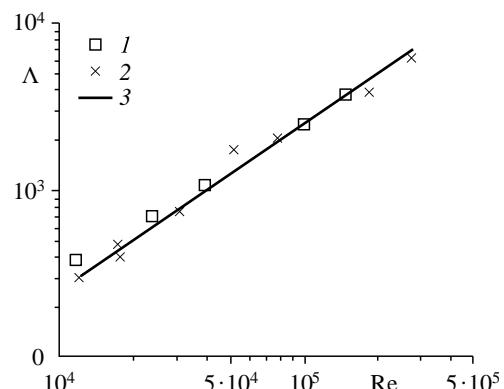


Рис. 7. Зависимость безразмерного комплекса Λ от числа Рейнольдса.

- 1 — расчет для свинца на сетке № 2,
- 2 — экспериментальные данные для воды,
- 3 — зависимость, аппроксимирующая экспериментальные данные для воды и расчетные данные для свинца.

здесь C — численный коэффициент, x — относительный шаг решетки, $\varphi = 1 - \pi / (2\sqrt{3}x^2)$ — пористость сборки, λ_{mol} — коэффициент молекулярной теплопроводности для воды или свинца, Pr — число Прандтля для воды или свинца, определяемое при средней температуре потоков и равное 5,42 и 0,016 соответственно.

Представленные на рис. 6 кривые 3 и 4 получены по формуле (1) с использованием значения коэффициента C , равного 0,0251. Это значение было получено путем аппроксимации экспериментальных данных для воды и расчетных данных для свинца в виде зависимости безразмерного комплекса $\Lambda = \lambda_{\text{eff}} / (\lambda_{\text{mol}}(x-1)\varphi\text{Pr})$ от числа Рейнольдса, представленной на рис. 7. Среднее относительное отклонение аппроксимирующей зависимости, приведенной на рисунке, от значений безразмерного комплекса Λ , соответствующих экспериментальным данным для воды и расчетным данным для свинца, составляет 1,9 %, а среднее квадратичное отклонение — 13,5 %.

Заключение

С использованием кода CONV-3D на основе DNS-подхода разработана численная модель, реализующая метод смешения двух параллельных потоков с разной температурой для определения эффективной теплопроводности стержневой структуры в направлении вдоль стержней при их поперечном обтекании.

Моделирование в QDNS-приближении условий эксперимента по смешению потоков воды разной температуры при поперечном обтекании экспериментальной сборки стержней показало хорошее согласование с результатами эксперимента. Отличие рассчитанных значений коэффициентов турбулентного переноса тепла вдоль сборки от экспериментальных данных составило 10 – 30 %, что соответствует погрешности используемой методики обработки результатов экспериментов.

В результате DNS-моделирования поперечного обтекания сборки стержней параллельными потоками свинца с разной температурой оценены значения эффективного коэффициента переноса тепла вдоль сборки.

Полученные значения коэффициентов эффективного переноса тепла вдоль сборки при ее поперечном обтекании для воды и свинца обобщены с использованием единой зависимости от числа Рейнольдса $\text{Re} = 1,2 \cdot 10^4 \div 2,7 \cdot 10^5$ и числа Прандтля $\text{Pr} = 0,016 \div 6$.

Список литературы

1. Корсун А.С., Круглов В.Б., Меринов И.Г., Федосеев В.Н., Харитонов В.С. Тепломассоперенос при обтекании структур типа пучков стержней в приближении модели пористого тела // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2014. № 2. С. 87–94.
2. Корсун А.С., Викулова С.В. К определению сопротивления анизотропного пористого тела // Тр. II Рос. нац. конф. по теплообмену. В 8 т. Т. 5: Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 215–218.
3. Власов М.Н., Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Рачков В.И., Харитонов В.С. Определение параметров интегральной модели турбулентности применительно к расчету обтекания стержневых сборок в приближении пористого тела // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 2. С. 209–218.
4. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкокометаллическим теплоносителем. М.: Энергоатомиздат, 1985. 158 с.
5. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. / Под общей ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010. 771 с.
6. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М. Энергоатомиздат, 1989. 183 с.

7. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов: уч. пособие. Ч. 1. Общие вопросы. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2001. 210 с.
8. Субботин В.И., Харитонов В.В., Плаксеев А.А., Алексеев С.В. Межканальный теплообмен при поперечном обтекании водой пучка труб // Теплоэнергетика. 1985. № 1. С. 42–44.
9. Рачков В.И., Федосеев В.И., Писаревский М.И., Корсун А.С., Меринов И.Г., Балберкина Ю.Н. Исследование продольного эффективного турбулентного переноса при поперечном обтекании коридорных пучков труб // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 29, № 3. С. 443–449.
10. Chudanov V.V., Aksanova A.E., Makarevich A.A., Pervichko V.A., Romero-Reyes I.V. Development of a method of direct numerical modeling of turbulent flows using a supercomputer // Atomic energy. 2015. Vol. 118, Iss. 4. P. 196–202.
11. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Моделирование течений несжимаемой жидкости в круглой трубе в ламинарном, переходном и турбулентном режимах с помощью кода CONV-3D // Атомная энергия. 2019. Т. 127, вып. 5. С. 295–298.
12. Niederschulte M.A., Adrian R.J., Hanratty T.J. Measurements of turbulent flow in a channel at low Reynolds numbers // Experiments in Fluids. 1990. No. 9. P. 222–230.
13. Spalart P.R. Strategies for turbulence modelling and simulations // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 2000. Vol. 21. P. 252–263.

*Статья поступила в редакцию 17 июля 2023 г.,
после доработки — 4 декабря 2023 г.,
принята к публикации 11 апреля 2024 г.*