РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2022

№ 5

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.257.122+624.138.41

ЗАКРЕПЛЕНИЕ РЫХЛОЙ ПОРОДЫ ИНЪЕКЦИЕЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ СМОЛЫ

Т. В. Шилова, С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Предложен и исследован способ закрепления рыхлых пород двухкомонентной органоминеральной смолой с продувкой реагентов вглубь массива сжатым газом. Приведены схема лабораторной установки, рецепт полимерного состава, свойства композиций и отвержденной смолы, методика воздействия. Дано описание экспериментов, рассмотрены результаты фильтрационных тестов, прочностных испытаний и анализа структуры пустотного пространства образцов песка, стабилизированных предлагаемым и стандартным однорастворным способами инъекции смолы. Показано преимущество последовательной закачки композиций по охвату среды химическим воздействием, удельному расходу реагентов, увеличению прочности.

Рыхлая порода, химическое закрепление, органоминеральная смола, двухрастворная инъекция, лабораторные исследования, структура пустотногоо пространства, фильтрационные и прочностные свойства

DOI: 10.15372/FTPRPI20220517

Химическое закрепление рыхлой породы производят путем нагнетания различных вяжущих материалов, реагирующих между собой, с водой или минералами, в результате чего порода становится более устойчивой и прочной, увеличивается ее сопротивление размыву. Чаще всего используют полимерные смолы, цементы, жидкое стекло [1]. Наилучшие результаты в стабилизации массива и гидроизоляции подземных сооружений дают полимеры. Применяют как однокомпонентные, так и двухкомпонентные смолы [2-6]. Первые из них полимеризируются при взаимодействии с пластовой водой, вторые — при смешивании композиций. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств тех и других приведен в [7-12].

Наиболее распространены однорастворные технологии, когда в среду подают готовый состав. Он может быть приготовлен заранее (однокомпонентные смолы) или получен смешиванием двух компонентов на устье или в стволе нагнетательной скважины. Особенностью такого подхода является постепенная полимеризация состава, начинающаяся еще до его поступления в породу. Сопутствующее повышение вязкости уменьшает глубину проникновения реагентов,

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 20-17-00087), https://rscf.ru/project/20-17-00087. В работе использовано оборудование ЦКП ГГГИ СО РАН.

приемистость скважины. В случае укрепления трещиноватого массива это позволяет снизить утечки нагнетаемой жидкости во второстепенные трещины и пустоты. Когда задача состоит в стабилизации рыхлой среды, то снижение текучести раствора, наоборот, вызывает негативный эффект — уменьшает область охвата породного массива воздействием. Кроме того, закачка веществ в состоянии уже начавшейся полимеризации загрязняет инъекционное оборудование, требует применения специальных растворителей для очистки [13, 14].

Чтобы избежать указанных трудностей, применяют двухрастворные технологии, в которых композиции нагнетают в породу последовательно или через разные скважины. Примером такого подхода является силикатизации грунтов — раздельная закачка водных растворов силиката натрия (крепитель) и хлористого кальция (отвердитель). Но при работе со смолами этот способ не применяют, поскольку эффективность полимеризации сильно зависит от равномерности перемешивания и распределения молекул реагентов в объеме готового состава. Неоднородность смеси ухудшает взаимодействие веществ, особенно у быстротвердеющих составов. Возможный способ преодоления этой проблемы, предложенный авторами, — предварительная закачка одной из композиций так, чтобы она обволакивала минеральные зерна без сплошного заполнения пустот между ними. Тем самым обеспечиваются условия контактного взаимодействия с молекулами второй композиции, нагнетаемой в следующую очередь. Чтобы достичь требуемого эффекта, предлагается продувать реагенты вглубь породы сжатым газом (азотом, воздухом).

Цель настоящей работы — исследование химического закрепления песчаной рыхлой породы инъекцией двухкомпонентной органоминеральной смолы с продувкой сжатым азотом. Такие смолы применяют для стабилизации нарушенного массива в зонах горно-геологических нарушений, в частности для укрепления влажного угля в проходческих забоях и лавах. Полимерам этого вида присущи высокие адгезия, прочность и эластичность, отсутствие вспенивания и расширения при контакте с водой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспериментах использовалась органоминеральная смола на основе полимерсиликата, разработанного авторами для закрепления рыхлых пород, повышения трещиностойкости массива, создания в нем противофильтрационных экранов, представляющих собой трещины гидроразрыва, заполненные полимером, в том числе с добавкой алюмосиликатных микросфер [15–17]. Она состоит из двух композиций, первая из которых (А) содержит натриевое жидкое стекло (78–90%), глицерин (10%), воду (10%) и в небольших количествах катализатор DMDEE (2.2'-диморфолинилдиэтиловый эфир), модификатор адгезии. Вторая композиция (Б) представляет собой смесь полиизоцианата (60–70%) и дибутилфталата (30–40%). Для получения готового полимерсиликата композиции смешиваются в объемной пропорции 1:1. На рис. 1 показаны зависимости вязкости композиций от температуры и готовой смолы от времени, прошедшего после смешивания композиций (характеристика отверждения). Измерения выполнены стандартным динамическим методом с использованием осцилляционного вискозиметра [18].

Динамические вязкости композиций A и Б при 25 °C равны соответственно 137 и 131 мПа·с (рис. 1*a*). Вязкость готовой смолы начинает расти сразу после смешивания композиций и уже через 10 с достигает 3000 мПа·с, а еще через 80 с — 8400 мПа·с (рис. 1*б*). При концентрации катализатора 0.8 % через 130–150 с начинает образовываться гель, а на 210–240 с происходит отверждение полимера. Температура реакции не превышает 45°C, вспенивание отсутствует. Отметим, что технические характеристики указанной смолы близки к известным органомине-ральным составам, сертифицированным для горных работ [19, 20].



Рис. 1. Зависимость вязкости композиций A и Б от температуры (a) и готовой органоминеральной смолы от времени после смешивания композиций (δ)

На рис. 2 приведены диаграммы деформирования отвержденного полимера при испытаниях на одноосное сжатие со скоростью 0.5 мм/мин. Диаметр образцов 37 м, высота 75 мм. Начальная стадия нагружения характеризуется линейной формой кривой (область I), угол наклона которой в полимерах зависит от скорости деформирования (проявление вязкоупругого поведения материала) [21]. Затем напряжение начинает расти медленнее из-за разрывов связей между макромолекулами (область II). При дальнейшем деформировании (область III) рост напряжения убыстряется за счет переориентации макромолекул (зависит от направления нагружения), и так продолжается вплоть до достижения предела прочности образца (20–22 МПа).



Рис. 2. Диаграммы "напряжение – деформация" образцов отвержденной органоминеральной смолы при испытаниях на одноосное сжатие со скоростью деформирования 0.5 мм/мин

На рис. За представлены образцы после одноосного нагружения 5 МПа (слева) и 20 МПа (справа). Хорошо видно изменение формы правого образца вследствие необратимых деформаций (рис. 3a). Дальнейшее повышение нагрузки ведет к разрушению материала, образованию в нем макротрещин (рис. 3b). То же наблюдается и при одноосном растяжении бразильским способом [22] (рис. 3b).

По результатам испытаний установлено, что прочность на одноосное сжатие отвержденного полимерсиликата, изготовленного по приведенному рецепту, равна 19.6–23.2 МПа, на растяжение — 4.1–4.4 МПа.

В роли укрепляемой породы в опытах выступал мелкозернистый песок средней плотности, гранулометрический состав которого определен методом рассеивания на наборе сит [23]:

Размер фракции, мм	1.8	1.4	1	0.8	0.4	0.2	< 0.2
Массовая доля, %	2.2	1.7	2.2	0.5	15.4	55	23



Рис. 3. Образцы отвержденной органоминеральной смолы после нагружения 5 и 20 МПа (a) и после разрушения при испытаниях на одноосное сжатие (δ) и растяжение (e)

Около 80 % массы песка — фракции с размером частиц менее 0.4 мм. Средние значения удельного веса частиц и насыпной плотности сухого песка равны соответственно $\rho_s = 2.64 \text{ г/см}^3$ и $\rho_d = 1.59 \text{ г/см}^3$. Коэффициент пористости составляет $e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d \approx 0.66$, а расчетное значение отношения объемов пустот и породы (пористость) — $n = e / (1+e) \approx 0.4$.

Для проведения экспериментов разработана лабораторная установка, состоящая из испытательной камеры (рис. 4*a*), двухканальной гидравлической станции раздельной подачи композиций и пневматической системы продувки растворов сжатым азотом. Цилиндрический образец рыхлой породы диаметром 9.2 см и высотой до 30 см размещаются внутри камеры в пластиковой оболочке с толщиной стенок 4 мм. Торцы прикрыты перфорированными проницаемыми пластинами. Они препятствуют высыпанию песка и способствуют формированию плоского фронта фильтрации реагентов. Композиции A и Б поступают по отдельным шлангам в смеситель, расположенный сверху образца. Давление нагнетания выбирается в диапазоне 0.01 - 1.5 МПа. Направление входных потоков и конструкция смесителя (рис. 4*б*) обеспечивают вихревое смешивание поступающих реагентов и равномерное распределение их молекул в готовой смоле.



Рис. 4. Испытательная камера (*a*) лабораторной установки по исследованию химического закрепления рыхлых пород и схематический разрез смесителя (б)

Химическое воздействие осуществлялось как стандартным однорастворным, так и предлагаемым двухрастворным способами. В первом случае композиции подавались в смеситель одновременно, во втором – последовательно. После инъекции каждого раствора, в том числе и готовой смолы, их дополнительно продували внутрь образца сжатым азотом. При этом маловязкие композиции удавалось закачать в породу почти полностью, а готовую смолу — лишь частично. Суммарный объем композиций, поступающих в смеситель, составлял 220 см³, что в 1.4–1.5 раз меньше порового объема образца. Давление нагнетания жидкостей и продувки газом в экспериментах равнялось 0.5 МПа, длительность инъекций — 10 мин. Обработанный образец выдерживали при нормальных условиях в течение 24 ч до полного отверждения полимерсиликата, после чего извлекали из испытательной камеры и определяли:

• объем закрепленной породы — по разнице между начальным и оставшимся после химического воздействия объемами сыпучего песка;

• количество закачанной в образец смолы — по уменьшению объема реагентов в смесителе с учетом изменения плотности при полимеризации.

Далее проводились исследования фильтрационных и механических свойств закрепленного песка, микроструктурный анализ. Полученные результаты использовались для сравнительного анализа эффективности тестируемых способов химического закрепления рыхлых пород.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований брались образцы объемом 800 см³ (высотой 12 см). В таблице приведены полученные значения объемов стабилизированного песка и затраченной на его закрепление органоминеральной смолы.

Получено, что средний расход реагентов, отнесенный к объему закрепленного песка, при однорастворной инъекции составил 0.368 ± 0.011 , при двухрастворной — 0.293 ± 0.021 или в 1.26 раза меньше. Пустоты стабилизированной породы заполнены полимером на 92 и 73 % соответственно. При воздействии готовой смолой удалось закрепить 14 % объема испытанных образцов, при двухрастворной инъекции — 42 %, т. е. глубина воздействия второго способа оказалась примерно в 3 раза больше. Причина — значительная разница между вязкостями композиций и готовой смолы (рис. 1).

	Объ	ем, см ³	Доля полимера	Остаточная пористость закрепленной породы, %						
Образец	закрепленной породы	инфильтрованной смолы	в объеме закрепленной породы							
Однорастворная инъекция										
1	114	42	0.368	3.2						
2	140	50	0.357	4.3						
3	90	34	0.378	2.2						
Среднее значение	114	42	0.368	3.2						
Двухрастворная инъекция										
4	394	124	0.315	8.5						
5	288	86	0.299	10.1						
6	354	94	0.265	13.5						
Среднее значение	332	94	0.293	10.7						

Объемы закрепленного песка и инфильтрованной в него органоминеральной смолы

Распределение полимерсиликата в поровом пространстве закрепленной породы изучалось с помощью электронного сканирующего микроскопа. Результаты приведены на рис. 5.



Рис. 5. Результаты сканирования электронным микроскопом шлифованных участков 1×1 мм породы, закрепленной двухрастворным (*a*) и однорастворным (*б*) способами инъекции органоминеральной смолы. Серым цветом выделены минеральные зерна, белым — отвержденный полимер, черным — пустоты

Видно, что при обработке двухрастворным способом отвержденный состав заполняет поровое пространство породы частично, обволакивая минеральные зерна пленкой. Между зернами остаются большие пустоты, которые могут соединяться между собой (открытая пористость). В массе самого полимера также имеются пустоты, но они изолированы, и их линейные размеры на порядок меньше (рис. 5a). Когда в песок закачивают готовую смолу, она практически полностью заполняет межзерновые пустоты (рис. 5b). Остаточная пористость обусловлена в основном малыми замкнутыми порами, хаотично расположенными внутри отвердевшего полимерсиликата (рис. 5b). Их размеры те же, что и при последовательной закачке композиций А и Б.

Особенности распределения пор свидетельствуют о более высокой проницаемости сред, закрепленных предлагаемым способом. Чтобы это подтвердить, были проведены фильтрационные тесты в условиях гидростатического сжатия образцов, имитирующего горное давление. Методика тестирования описана в [24].

В ходе экспериментов установлено, что при всестороннем сжатии 1-3 МПа и градиенте давления линейной фильтрации газа 1.5-3.0 МПа/м образцы песка, закрепленного инъекцией готовой органоминеральной смолы, слабопроницаемы (коэффициент проницаемости k < 10 мД). При последовательной закачке композиций значение k стабилизированного песка достигает 250-650 мД (рис. 6).



Рис. 6. Зависимость коэффициента проницаемости k песка, закрепленного двухрастворным способом инъекции органоминеральной смолы, от гидростатического сжатия σ : точки — экспериментальные данные; сплошная кривая — экспоненциальная аппроксимация $k = 772.03 \cdot e^{-0.348\sigma}$ (коэффициент детерминации $r^2 = 0.8512$)

Отметим, что хорошая остаточная проницаемость массива, закрепленного химическим воздействием, может быть как желательна, так и нет. Следует учитывать цели воздействия. Если речь идет о повышении прочности трещиноватых участков, то применение однорастворной технологии позволяет снизить расход реагентов. При стабилизации рыхлых пород двухрастворный способ более эффективен как по охвату воздействием, так и по удельному расходу химических веществ. Его можно рекомендовать, когда нет необходимости в снижении водопроницаемости обрабатываемой среды и важно сохранить ее дренажные свойства, например при закреплении грунтовых оснований, путей проезда автотранспорта в горных выработках и др. Если нужна гидроизоляция, то можно использовать комбинированный подход: сначала закреплять большой объем массива двухрастворным способом, а затем создавать в нем небольшой противофильтрационный слой путем дополнительной закачки готовой органоминеральной смолы.

Качество закрепления в экспериментах оценивалось по пределу прочности на одноосное сжатие. Скорость деформирования та же, что при испытаниях отвержденного полимера (рис. 2). На рис. 7 приведены фотографии выбуривания образца из стабилизированного песка и его тестирование на одноосное сжатие.



Рис. 7. Выбуривание образца закрепленной полимером породы (*a*) и его испытание на одноосное сжатие (*б*)

Примеры полученных диаграмм деформирования представлены на рис. 8.

При двухрастворном способе предел прочности закрепленного песка на одноосное сжатие примерно в 2 раза выше, чем у традиционной однорастворной технологии (рис. 8), и это несмотря на то, что удельный расход реагентов меньше. Песок, пропитанный готовой смолой, выдерживает значительные продольные деформации ε . Предел прочности достигается при $\varepsilon = 0.35 - 0.55$ (рис. 8*a*, *в*), в то время как при последовательной инъекции — при $\varepsilon \approx 0.18$ (рис. 8*б*, *г*). После начала разрушения нагрузочная способность песка, стабилизированного стандартным способом, сохраняется при больших значениях ε (см. нисходящие ветви на рис. 8).

Восходящие участки графиков "напряжение – деформация" закрепленного песка показывают, что, начиная с некоторой нагрузки, темп приращения напряжения возрастает (рис. 8). В этом они похожи на диаграммы деформирования отвержденного полимера (рис. 2). Но если в последнем ускорение заметно при напряжении 6–8 МПа (рис. 2), то в закрепленных образцах при 2–3 МПа (рис. 8). Таким образом, порода, подвергнутая воздействию, проявляет свойства, присущие эластомерам, но в меньшей мере, чем полимерсиликат.



Рис. 8. Диаграммы деформирования образцов породы, закрепленной полимером однорастворным (a, e) и двухрастворным (b, c) способами, при испытаниях на одноосное сжатие со скоростью деформирования 0.5 мм/мин

Интересно, что по мере снижения доли смолы в объеме материала его прочность меняется нелинейно. Так, чистый полимер начинает разрушаться при напряжении 20–22 МПа, а песок, пустоты которого заполнены полимером на 92% (однорастворная инъекция), — при 7.1–7.7 МПа. Уменьшение заполненности порового пространства до 77% (двухрастворная инъекция, образцы 4, 5 в таблице) увеличивает прочность до 12.0–16.9 МПа. Такая выраженная немонотонная зависимость механических свойств закрепленной среды от удельного расхода реагентов свидетельствует о необходимости оптимизации режима воздействия применительно к условиям конкретной задачи.

В натурных условиях раздельная последовательная инъекция компонентов быстродействующих двухкомпонентных полимерсиликатов в породу может быть реализована через обсаженную скважину с открытым забоем или ее перфорированный интервал, изолированный механическим герметизатором (пакером).

выводы

Предложен двухрастворный способ химического закрепления рыхлых пород, включающий последовательную закачку композиций двухкомпонентной органоминеральной смолы с продувкой вглубь массива сжатым газом.

В ходе лабораторных экспериментов на образцах песка получено, что средний расход реагентов на объем стабилизируемой среды по предлагаемому способу в 1.26 раз меньше, чем по стандартной однорастворной технологии с инъекцией готового состава. Переход к последовательной закачке композиций позволяет увеличить глубину проникновения реагентов в породу примерно в 3 раза. При этом отвержденный полимер заполняет поровое пространство частично, сохраняя между минеральными зернами протяженные пустоты. В результате образцы, закрепленные двухрастворной инъекцией, остаются хорошо проницаемыми (коэффициент проницаемости 250–560 мД).

Несмотря на меньший удельный расход реагентов, прочность породы, стабилизированной предлагаемым способом воздействия, почти в 2 раза выше, чем по обычной однорастворной технологии. Предлагаемый способ может быть полезен в решении различных геотехнических задач, особенно когда нужна высокая остаточная проницаемость стабилизированного массива, например для уменьшения пескопроявления в нефтегазодобывающих скважинах, вскрывших неустойчивые коллекторы. Если требуется снизить водоприток, то после закрепления породы предлагаемым способом в ней может быть создан противофильтрационный слой путем дополнительной закачки небольшого объема готовой смолы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве. СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011. М.: БСТ, 2012. 73 с.
- 2. Bodi J. et al. Polyurethane grouting technologies, Polyurethane, 2012. P. 307–337.
- **3.** Soucek K., Scucka L. S. J., and Martinec P. Chemical grouting–laboratory study of chemical grouts and geocomposites properties, Int. Conf. IACMAG/12./, Bombay: Indian Institute of Technology Bombay, 2008. C. 3567–3574.
- 4. Sabri M. M. S., Vatin N. I., and Alsaffar K. A. M. Soil injection technology using an expandable polyurethane resin: A Review, Polymers, 2021, Vol. 13, No. 21. P. 3666.
- 5. Zhang Z., Liu K., and Ye L. Application of polymer grouting reinforcement technology in the treatment of slope collapse, AER-Advances in Eng. Research, 2016, Vol. 84. P. 244–249.
- 6. Trifunović P., Tokalić R., and Ganić A. Application of polymer composites for stabilization of degraded rock mass in mining, Podzemni Radovi, 2013, No. 22. P. 23–31.
- Hu X. and Wang Dm. Enhanced fire behavior of rigid polyurethane foam by intumescent flame retardants, J. Appl. Polym. Sci., 2013, Vol. 129, No. 1. — P. 238–246.
- 8. Hu X., Cheng W., and Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine, Russian J. Applied Chemistry, 2014, Vol. 87, No. 8. P. 1099–1108.
- 9. Shen H. and Nutt S. Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam, Composites Part A: Appl. Sci. and Manufacturing, 2003, Vol. 34, No. 9. C. 899–906.
- 10. Rangari, V. K., Hassan, T. A., Zhou, Y., Mahfuz, H., Jeelani, S., and Prorok, B. C. Cloisite clay ☐ infused phenolic foam nanocomposites, J. Appl. Polym. Sci., 2007, Vol. 103(1). P. 308-314.
- 11. Васильев В. В. Полимерные композиции в горном деле. М.: Наука, 1986. 294 с.
- 12. Hu X., Cheng W., and Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine, Russian J. Appl. Chemistry, 2014, Vol. 87, No. 8. P. 1099–1108.
- 13. Šňupárek R. and Souček K. Laboratory testing of chemical grouts, Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, Vol. 15, No. 2. P. 175–185.
- 14. Cornely W. Elastified silicate resins and polyurethane foam resins for the stabilisation of strata a comparison, Proc. 6th Int. seminary reinforcement and sealing of rock and construction at the beginning of 21st century, Ostrava, February 2001. 2001.
- Shilova T. V. and Rybalkin L. A. Study of polymer compositions for formation of impermeable inclusions in rock mass, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., IOP Pub., 2022, Vol. 991, No. 1. P. 012008.

- 16. Kurlenya, M. V., Serdyukov, S. V., Shilova, T. V., and Patutin, A. V. Development of chemical compositions for impervious screens in rocks, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2017, Vol. 53. — P. 01221.
- 17. Сердюков С. В., Шилова Т. В. Проппант и рабочие жидкости для создания дренажных каналов в угольном пласте методом гидроразрыва // Интерэкспо ГЕО-СИБИРЬ. — Новосибирск, 2018. — Т. 6. — С. 188–196.
- **18. Композиты** полимерные. Метод определения характеристик при отверждении термореактивных смол. ГОСТ Р 57694-2017. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
- **19.** Геофлекс (Geoflex) органоминеральная смола. [Электронный pecypc]. URL: https://www.minova.kz/uploads/files/0008_Органоминеральная_смола_Геофлекс.pdf (дата обращения 29.04.2022).
- **20.** Двухкомпонентная органоминеральная смола "Блоксил". [Электронный ресурс]. URL: https://www.dsi-techno.ru/produkcija/organomineralnye-smoly-dlja-uprochnenija/bloksil (дата обращения 29.04.2022).
- 21. Аскадский А. А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
- 22. Diyuan Li and Louis Ngai Yuen Wong. The brazilian disc test for rock mechanics applications: Review and new insights, Rock Mech. and Rock Eng., 2013, Vol. 46. P. 269–287.
- **23.** Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. ГОСТ 12536-2014. — М.: Стандартинформ, 2015. — 24 с.
- 24. Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород // ФТПРПИ. 2017. №. 5. С. 172–180.

Поступила в редакцию 13/VIII 2022 После доработки 02/IX 2022 Принята к публикации 21/IX 2022