

## ВОДОПРОЯВЛЕНИЯ В ТОННЕЛЯХ С ВЫСОКОТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКОЙ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

И.М. Загоршменный<sup>1</sup>, А.И. Загоршменный<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,  
e-mail: zakorshmenniy\_i@ipkonran.ru

<sup>2</sup> АО «Мосметрострой», Москва, Россия

**Аннотация:** Проблемы транспорта в мегаполисах решаются в основном за счет освоения подземного пространства преимущественно механизированными тоннелепроходческими комплексами с использованием кольцевых обделок из высокоточных железобетонных блоков. Наиболее слабым местом гидроизоляции железобетонной сборной конструкции транспортных тоннелей является стыковое соединение блоков обделки, герметичность которого обеспечивается расположенной по периметру высокоточного блока уплотнительной резиновой прокладкой. В процессе щитовой проходки могут происходить деформации колец тоннельной обделки, в результате чего нарушается герметичность уплотнений и водонепроницаемость обделки тоннеля. Широкое применение нашла технология герметизации фильтрующих швов сегментов обделки, включающая работы по предварительной заделке (чеканке) дефектных швов сборной железобетонной обделки ремонтным материалом и последующей прокачки зачеканенного участка метакрилатным гелем через сетку пакеров. Инъектирование геля осуществляется в полость, ограниченную с двух сторон торцами железобетонных блоков обделки, со стороны грунтового массива — контуром резинового уплотнителя, а со стороны внутреннего контура обделки — границей зачеканенного в шов ремонтного материала. В полости формируется некая мембрана относительно небольшой толщины, которая не способна выдерживать значительное гидростатическое давление и результат ремонта является недолговечным. Наиболее перспективным и эффективным способом устранения водопроявлений является технология инъектирования однокомпонентной эластичной полиуретановой смолы за уплотнительный контур тоннельной обделки через игольчатый пакер, без повреждения конструкции самого железобетонного блока. Уплотнительная резиновая прокладка блока обделки служит барьером для целенаправленного нагнетания и распространения инъекционной смолы за обделкой тоннеля и эффективного устранения места водопроявления.

**Ключевые слова:** подземные сооружения, водопроявления в тоннелях метрополитена, водонепроницаемость стыков обделки, инъектирование за контур обделки, игольчатый пакер, однокомпонентные эластичные полиуретановые смолы, ремонтно-восстановительные работы.

**Для цитирования:** Загоршменный И. М., Загоршменный А. И. Водопроявления в тоннелях с высокоточной железобетонной обделкой и способы их устранения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 17–32. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_17.

---

## Water ingress events and their elimination in tunnels with high-precision reinforced concrete lining

I.M. Zakorshmennyi<sup>1</sup>, A.I. Zakorshmennyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: zakorshmennyi\_i@ipkonran.ru

<sup>2</sup> Mosmetrostroy JSC, Moscow, Russia

---

**Abstract:** Transportation problems in megacities are mostly solved using tunnels made in the underground space with the help of tunnel boring machines and reinforced concrete blocks of high-precision lining tubing. The weakest point in the waterproofing in the split-type reinforced-concrete lining for the transportation tunnels is the butt junction of the blocks. Sealing of the junctions is ensured by placing a rubber gasket along the high-precision block perimeter. During shield-driven tunneling, the tunnel lining can be deformed, which results in the seal failure of the gasket and in the permeability of the tunnel lining. The widely applied technology of sealing permeable butt junctions between the blocks of lining includes preliminary restraint (calking) of defective welds in the split-type reinforced concrete lining with repair materials and subsequent injection of the calked weld with methacrylate gel using a set of packers. Gel is injected in a void bounded by the faces of the reinforced concrete lining blocks on two sides, by the rubber gasket on the side of rock mass and by the calked repair material on the back side of the lining. A relatively thin membrane generated in the void is incapable to stand a high hydrostatic pressure, and the repair effect is non-durable. The most promising and effective method to eliminate water ingress events is the technology of injection of a single-component elastic polyurethane resin behind the sealing gasket of the tunnel lining through needle-like packer, without damaging the structure of the reinforced concrete block. The sealing rubber gasket serves in this case as a barrier for injection and spreading of the resin behind the tunnel lining, and enables effective elimination of water ingress in the tunnel.

**Key words:** underground structures, water ingress events in subway tunnels, water impermeability of lining junctions, injection behind the lining, needle-like packer, single-component elastic polyurethane resins, repair and renewal operations

**For citation:** Zakorshmennyi I. M., Zakorshmennyi A. I. Water ingress events and their elimination in tunnels with high-precision reinforced concrete lining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(4):17-32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_17.

---

### Введение

Расширение территории и увеличение численности населения крупных городов, в частности, в Москве, в условиях плотной городской застройки и насыщенного трафика дорожных сетей, заставляют уделять все большее внимание освоению подземного пространства [1 – 3]. При этом строительство, как правило, ведется во все более усложняющихся условиях, требующих осуществления

постоянного мониторинга не только во время строительства, но и эксплуатации подземных сооружений [4 – 6]. Указанные обстоятельства требуют обоснованного подхода к назначению прочностных и гидроизоляционных характеристик применяемых материалов конструкций подземных сооружений [7 – 9].

В настоящее время при закрытом способе строительства транспортные тоннели сооружаются в большинстве

случаев с применением механизированных тоннелепроходческих комплексов (ТПМК) [10], в сочетании преимуществ подземного сооружения тоннелей со строительством открытым способом [11–13].

При использовании данной технологии гидроизоляция тоннеля обеспечивается за счет высокой водонепроницаемости блоков обделки и герметизации стыков между ними [14–16]. Дополнительным элементом гидроизоляции является тампонаж технологического зазора между внешним контуром обделки тоннеля и разработанным грунтовым массивом. Эффективность тампонажных работ определяется полнотой заполнения зазора и характеристиками применяемого раствора [17]. По мере совершенствования физико-механических и технологических свойств бетонных смесей, а также технологии формирования конструкций, область применения железобетонной обделки стремительно расширялась [18].

Несмотря на совершенствование физико-механических и технологических свойств бетонных смесей, а также технологии формирования конструкций железобетонной обделки [18], по-прежнему наиболее слабым местом обеспечения водонепроницаемости сборной конструкции тоннелей является стыковое соединение конструктивных элементов (блоков обделки).

В процессе эксплуатации тоннелей вследствие динамических нагрузок от подвижного состава или деформации вмещающего массива в стыковых соединениях туннелей могут возникать трещины, по которым вода проникает внутрь подземного сооружения. Это приводит к необходимости постоянного контроля состояния стыков и периодического их ремонта [14, 19]. В данной работе приведено описание способа устранения водопроявления.

## Материалы и методы

В настоящее время широко применяется технология проходки тоннелей тоннелепроходческими механизированными комплексами (ТПМК) с использованием сборных железобетонных обделок, обеспечивающих требуемую несущую способность и герметичность. Водонепроницаемость обделки обеспе-



Рис. 1. Высокоточные железобетонные блоки с резиновым контуром

Fig. 1. High-precision reinforced concrete blocks with rubber-sealed perimeter

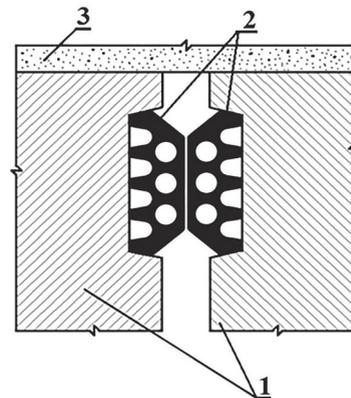


Рис. 2. Стык между железобетонными блоками при монтаже сборных водонепроницаемых обделок: 1 – водонепроницаемые железобетонные блоки; 2 – резиновые уплотнители; 3 – тампонажный раствор

Fig. 2. Junction of reinforced concrete blocks in assemblage of water impermeable lining: 1 – waterproof reinforced concrete blocks; 2 – rubber gaskets; 3 – grouting

чивается наличием на блоках в торцевых частях резинового уплотнительного контура (рис. 1, 2) и нагнетанием тампонажного раствора в строительный зазор в процессе проходки в соответствии с СТО 6658209531-003-2017.

### **Характерные дефекты и причины водопроявлений в тоннелях с высокоточной железобетонной обделкой**

Возможные дефекты и повреждения высокоточных железобетонных блоков, выявляемые в процессе обследований показаны на рис. 3: трещины, сколы кромок отдельных блоков, нарушения защитного слоя, отслоения в стыковочных узлах и болтовых гнездах, нарушение уплотнительного контура блоков обделки («закус») или взаимное смещение резинового контура и др.).

Проникновение воды в транспортные тоннели со сборными обделками (рис. 4) происходит через стыковочные швы между сборными блоками при нарушении уплотнительного контура или через трещины в блоках. Дефекты и повреждения сборной железобетонной обделки могут возникать в процессе сооружения тоннеля (различное давление домкратов щита при проходке на нелинейных участках и в неустойчивых грунтах, нарушения давления нагнетания тампонажного раствора за обделку, нарушения правил работ в процессе

перегрузки и перемещения блоков на строительной площадке).

Ремонт железобетонных конструкций транспортных тоннелей метрополитена осуществляют на всех стадиях их существования от момента строительства. На стадии сдачи объекта в эксплуатацию обычно устраняют дефекты, допущенные в ходе строительства, и занимаются лечением трещин. В процессе эксплуатации в числе других выполняют ремонты, направленные на восстановление и увеличение прочностных характеристик отдельных конструкций или сооружения в целом. Работы ведутся в соответствии с разработанным технологическим регламентом на ремонт монолитных железобетонных конструкций и обделки тоннелей метрополитена в условиях строительства.

### **Применение инъекционных материалов для устранения водопроявлений через сборную железобетонную обделку тоннеля**

Для обеспечения эффективного устройства инъекционной гидроизоляции и выбора требуемых материалов необходимо разработать определенный алгоритм, четко устанавливающий последовательность и условия выполнения работ, позволяющих обосновать правильный выбор материалов, необходимых для производства работ [20, 21].



Рис. 3. Сколы, трещины и течи

Fig. 3. Splits, cracks and leaks



Рис. 4. Фильтрация воды через стыковые соединения конструктивных элементов высокоточной железобетонной обделки

Fig. 4. Water seepage through butt junctions of structural members of high-precision reinforced concrete lining

Для восстановления и обеспечения водонепроницаемости сооружения [22] рекомендуется система инъекционных эластомерных смол на полиуретановой основе, применяемая при отсутствии и наличии давления воды.

Отремонтированные участки стыковых соединений и трещин в обделке должны отвечать требованиям по восприимчивости деформаций. При наличии напорной воды рекомендуется выполнение двухступенчатой инъекции: временная герметизация напорной воды быстровспенивающейся смолой и заключительная герметизация эластомерной смолой [20].

Эластомерные смолы на полиуретановой основе позволяют герметизиро-

вать стыки и трещины на длительный срок, независимо от влажности субстрата [20].

Для борьбы с водопитоками и устранения протечек через швы сборных конструкций тоннельной обделки по соотношению стоимости и эффективности наибольшее распространение получили акрилатные гели и полиуретановые смолы.

Акрилатные гели характеризуются быстрым гелеобразованием с возможностью регулировки времени реакции. Это особенно важно при проведении аварийных работ, когда требуется незамедлительное устранение течи через дефектный участок сооружения. Усадка или набухание материала при измене-

нии уровня воды представляет собой обратимый процесс. После отверждения гель имеет высокую эластичность и способен выдерживать динамические нагрузки [20]. Предотвращение водопроявлений в тоннелестроении с применением акрилатных гелей более всего подходит при устройстве инъекционной противофильтрационной завесы грунтового массива по внешней границе сооружения, герметизации деформационных и конструкционных швов, стабилизации плывунов.

Основными достоинствами акрилатных гелей являются высокая проникающая способность в трещины с раскрытием менее 0,3 мм, способность выдерживать деформации с сохранением водонепроницаемости, высокая адгезия и эксплуатационные свойства.

Стабильность химического состава полиуретановых смол обеспечивает устранение водопроявления на длительный период.

### **Определение и фиксация дефектных участков тоннелей, требующих ремонтно-восстановительных работ**

Дефектные участки тоннелей определяются путем визуального осмотра лицами технического надзора заказчика строительства объекта на период строительства или службой эксплуатации после сдачи объекта. Результаты осмотра отражаются в журнале «Осмotra крепи и состояния выработки» или в другом, специальном журнале, утвержденном распорядительным документом предприятия, и являются первичным основанием для углубленного исследования дефектов и последующего ремонта.

Для выполнения комплекса ремонтных работ по устранению дефектов и водопроявлений в конструктивных элементах стыковых соединений высокоточной железобетонной обделки при сооруже-

нии перегонных тоннелей на каждый объект разрабатывается соответствующий регламент. В основу регламента закладываются современные требования к выбору материалов и технологии ведения ремонтных работ в соответствии с положениями «Руководства по ремонту бетонных и железобетонных конструкций с учетом совместимости материалов» и требований Межгосударственного стандарта ГОСТ 32016-2012 «Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций». Работы по ремонту производят на основании результатов комиссионного обследования конструкций, проводимого с участием представителей заказчика.

### **Технология герметизации фильтрующих швов обделки с предварительной зачеканкой и последующим инъектированием через сетку пакеров**

В последнее десятилетие в России и других странах на практике широко применяется технология герметизации фильтрующих швов сегментов обделки и устранения водопроявлений, состоящая из двух этапов. Предварительная заделка (чеканка) швов ремонтным материалом на цементной основе и последующее инъектирование метакрилатного геля в зачеканенный участок через сетку пакеров [23, 24].

Перед зачеканкой стыка в местах наличия активной фильтрации необходимо установить гидропломбу из быстротвердеющего материала на цементной основе. После остановки активной протечки осуществляется зачеканка стыковых соединений высокоточной железобетонной обделки (рис. 5, выделено темно-серым цветом) безусадочным быстротвердеющим ремонтным материалом, предназначенным для конструкционного ремонта бетона и железобетона. После этого осуществляется инъектирова-

ние метакрилатного геля с добавкой через кольцевые и радиальные стыки для локализации зоны производства инъекционных работ [23].

Далее осуществляется разметка мест бурения шпуров под пакеры с применением электропневматического оборудования. На расстоянии 200–300 мм от продольного стыка, непосредственно в зачеканенный радиальный стык примыкания сегментов под углом 90° бурят шпуров диаметром 12–16 мм. Схема бурения шпуров представлена на рис. 6. Затем в шпуров устанавливаются пакеры. Нагнетание метакрилатного инъекционного состава в установленные пакеры через соединительные шланги осуществляется специальным пневматическим инъекционным насосом типа Desoi PN 1412. Нагнетание производится, начиная с нижнего пакера до появления инъекционного материала в соседнем пакере. После этого следует перейти к следующему по ходу пакеру и повторить процесс. После завершения работ оборудование тщательно промывается специальными составами в соответствии с инструкцией по его эксплуатации, остатки инъекционного материала с поверхности бетона удаляются механически, отверстия заделываются.

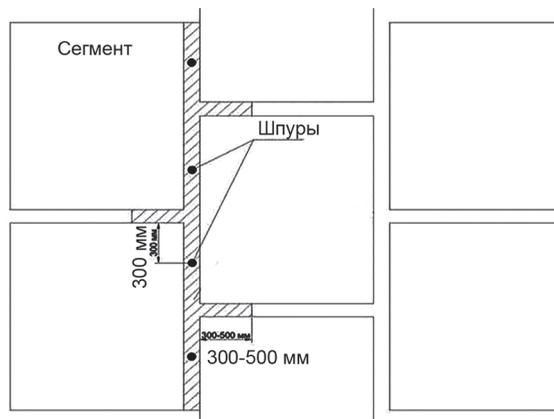


Рис. 6. Схема бурения шпуров  
Fig. 6. Drilling pattern



Рис. 5. Зачеканка стыков  
Fig. 5. Calking of junctions

### Результаты и обсуждения

На основании анализа традиционной технологии устранения водопроявлений стыковых соединений железобетонных блоков обделки выявлены следующие технические и технологические недостатки:

- Трудоемкие, длительные работы по заделке (чеканке) вручную стыковых соединений конструктивных элементов высокоточной железобетонной обделки ремонтным материалом на цементной основе.
- Сложно локализовать область ремонтных работ для эффективного инъек-

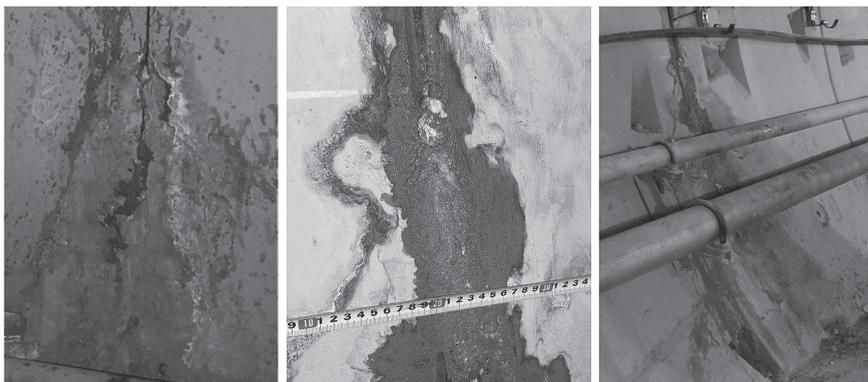


Рис. 7. Возобновление водопроявлений и фильтрации воды в местах ранее выполненных ремонтных работ по устранению протечек воды через стыковое соединение конструктивных элементов обделки  
 Fig. 7. Reopening of water ingress and seepage at places of previous repair aimed to eliminate water leaks through butt junctions of structural components of lining

тирования и устранения протечек. Фильтрация воды через поврежденное резиновое уплотнение сегмента обделки может происходить в одном месте, но из-за перемещения по шву обделки водопроявление может визуально проявляться в другом месте.

- Требуется значительное количество используемых пакеров и точек инъектирования акрилатного геля для устранения одного участка водопроявления. Это влечет за собой затраты времени и неэкономичное использование материала и расходников.

- Применяемый для зачеканки межблочных швов ремонтный материал, как правило, не способен длительное время выдерживать динамические нагрузки в процессе эксплуатации транспортного тоннеля, и со временем вываливается, формируя новые места протечек.

Самым главным недостатком данной технологии является то, что инъектирование метакрилатного геля осуществляется в полость, ограниченную с двух сторон торцами железобетонных блоков обделки, со стороны грунтового массива — контуром резинового уплотнения, а со стороны внутреннего контура обделки — границей зачеканенного в шов ремонтного материала. Таким образом,

проблема устранения притока воды к месту деформации резинового уплотнения блока обделки решается путем формирования некой мембраны из метакрилатного геля посередине стыкового соединения блока. Поскольку толщина этой мембраны относительно небольшая, то, как правило, место ремонта не способно выдерживать значительное гидростатическое давление и результат является недолговечным (рис. 7).

Собранная авторами за последние 5 лет статистика по ремонту и повторным возобновлениям фильтрации воды через стыковые соединения отремонтированных ранее участков тоннелей по технологии предварительной заделки (чеканки) швов сборной железобетонной обделки и последующего инъектирования зачеканенного участка через сетку пакеров метакрилатного геля свидетельствует о том, что свыше 30% отремонтированных швов требуют повторного ремонта в течение гарантийного периода, который, как правило, составляет 5 лет. Точных причин такой статистики отказов выявить не удалось, но, по мнению авторов, наиболее очевидным является трещинообразование в зачеканенном в шов ремонтном материале от динамических воздействий подвижного состава в

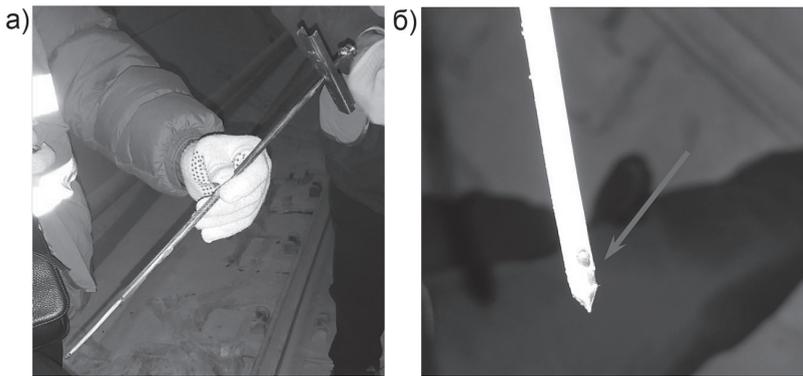


Рис. 8. Общий вид инъекционного игольчатого пакера (а) и инъекционное отверстие игольчатой части пакера для нагнетания за уплотнительный элемент блока обделки (б)

Fig. 8. General view of needle-like injection packer (a) and injection hole in packer needle for injection behind lining block gasket (b)

процессе эксплуатации транспортного тоннеля и низкая адгезия метакрилатного состава в стыковом соединении к поверхности торцевой части блоков обделки из-за наличия загрязнений в процессе строительства объекта, а также небольшая толщина образующейся в процессе химической реакции метакрилатного геля с водой мембраны, не способной выдерживать значительное гидростатическое давление.

Практически всех выше упомянутых недостатков лишена технология устранения водопроявлений в конструктивных элементах стыковых соединений высокоточной железобетонной обделки при сооружении перегонных тоннелей, применяемая специализированными организациями г. Москвы. Принципиальное отличие технологии заключается в применении в качестве инъектора игольчатого пакера специальной конструкции (см. рис. 8), нагнетательная трубка которого устанавливается в стыковое соединение блоков высокоточной железобетонной обделки, а игольчатая часть проходит насквозь через уплотнительную резинку и выходит за уплотнительный элемент блока. Принципиальное отличие технологии заключается в том, что в качестве инъекционного материала при-

меняется гидроактивная полиуретановая смола, которая инъецируется за уплотнительный контур тоннельной обделки, не повреждая конструкцию самого блока. Уплотнительная резиновая прокладка железобетонного блока служит барьером для целенаправленного нагнетания и распространения инъекционной смолы за обделкой тоннеля и эффективного устранения места водопроявления.

### **Технология герметизации фильтрующих швов обделки инъектированием за уплотнительный элемент блока обделки через игольчатый пакер**

При подготовке к инъектированию производится разметка мест под установку игольчатых пакеров. Минимальное рекомендуемое расстояние между пакерами 200 мм. Далее необходимо пробурить шпуры в стыке (шве) между блоками до уплотнительных элементов (рис. 9). Диаметр шпура  $\varnothing 10$  мм определяется диаметром подающей трубки игольчатого пакера. Глубина бурения определяется конструктивными особенностями ж/б блока — размером от внутренней поверхности блока до уплотнительного элемента. С помощью молотка

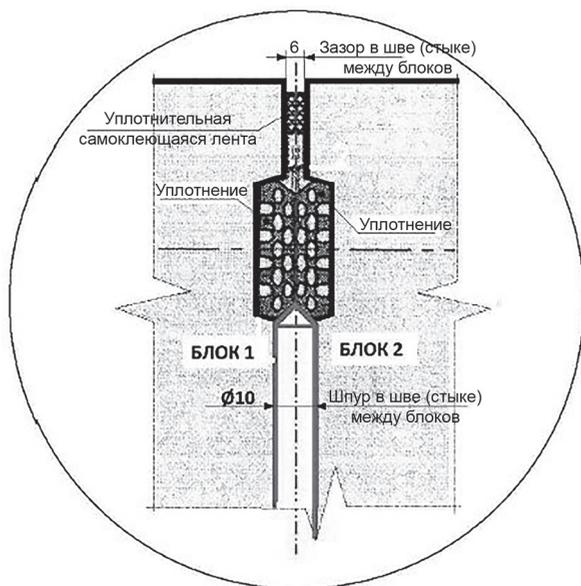


Рис. 9. Схема бурения шпуров в стыке между блоками до уплотнительных элементов  
 Fig. 9. Drilling pattern at junction of blocks down to gasket

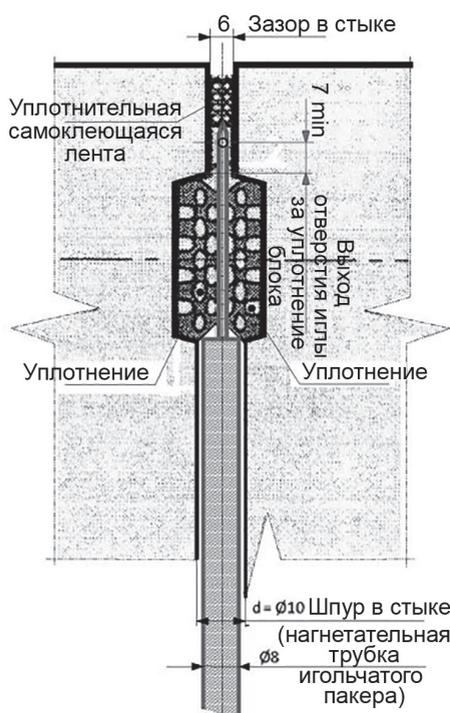
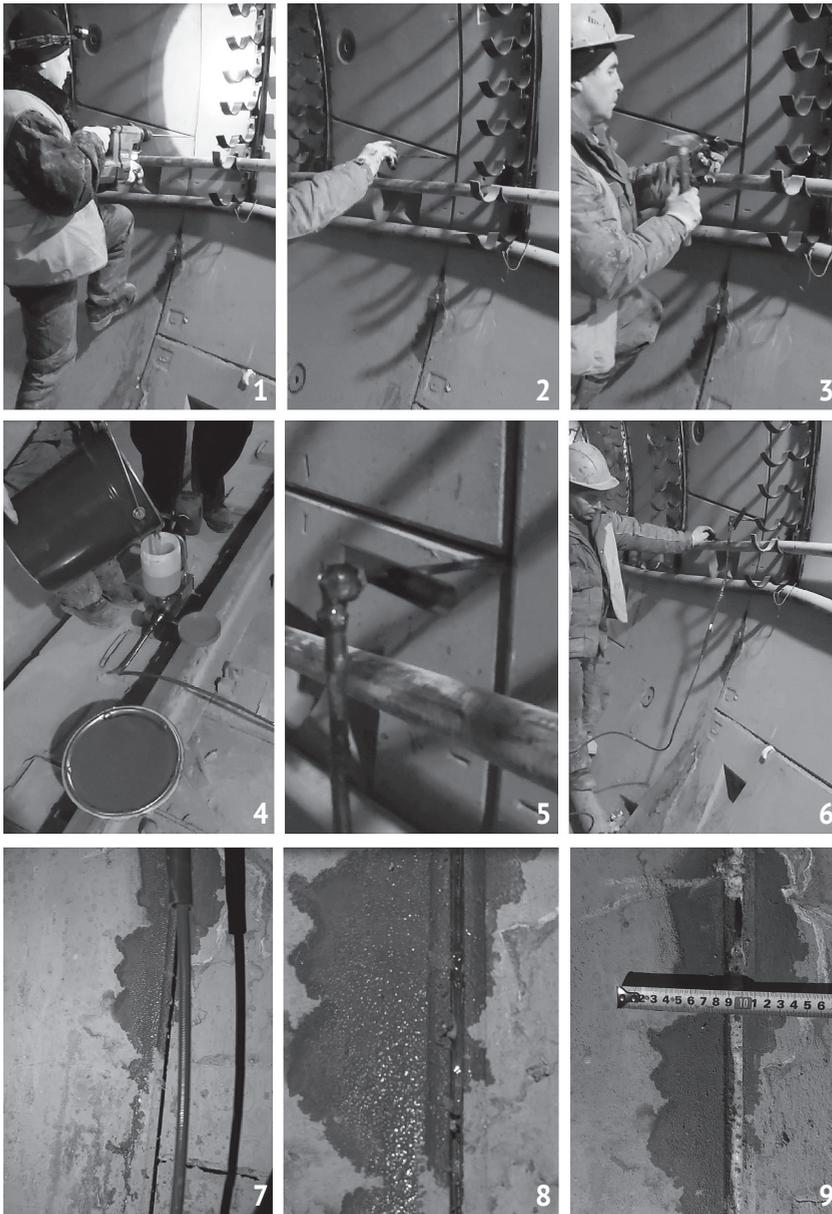


Рис. 10. Выход инъекционной иглы за уплотнительный элемент блока  
 Fig. 10. Appearance of injection needle behind block gasket a

производится пробивка игольчатого пакера через уплотнительную резину таким образом, чтобы отверстие инъекционной иглы выходило за уплотнительные элементы блоков обделки (рис. 10).

Инъектирование производится в соответствии с нормами расхода, составляющими ориентировочно 5,0 кг/пакер. Практический опыт показал, что этого количества достаточно для эффективного устранения протечки через шов протяженностью 1 пог. м. Давление при нагнетании не превышает 7,0 МПа. В вертикальных стыках инъектирование необходимо начинать с нижнего пакера. После проведения инъекции в одной точке необходимо перейти к следующей по ходу пакера и повторить процесс по всей длине участка. По окончании полимеризации инъекционного состава пакеры демонтируются. Остатки прореагировавшего материала с поверхности бетона удаляются механически. Последовательность производства работ по ликвидации водопроявлений инъектированием однокомпонентной эластичной



1 – Бурение шпура  $\varnothing 10$  мм в стыковом соединении блоков; 2 – Установка игольчатого пакера в шпур; 3 – Пробивка игольчатой частью пакера уплотнительной резинки; 4 – Заправка емкости инъекционного насоса полиуретановой смолой; 5 – Монтаж инъекционного штуцера на головку пакера; 6 – Нагнетание смолы за резиновый уплотнитель обделки; 7 – Вытеснение воды через дефектный участок расширяющейся пеной; 8 – Выход расширяющейся полиуретановой смолы через дефектный участок обделки; 9 – Остановка фильтрации воды и завершение процесса полимеризации смолы

*Рис. 11. Последовательность производства работ по ликвидации водопроявлений через стыковое соединение конструктивных элементов обделки тоннеля с применением игольчатого пакера*  
*Fig. 11. Sequence of operations on elimination of water ingress through butt junctions of structural components of tunnel lining using needle-like packer*

полиуретановой смолы за уплотнительный элемент блоков обделки тоннеля через игольчатый пакер представлена на рис. 11.

На основании представленной технологии устранения водопроявлений в стыковых соединениях конструктивных элементов высокоточной железобетонной обделки за последние 3 года компанией ООО «Центр гидроизоляционных технологий» (ООО «ЦГТ») были успешно отремонтированы около 9 км тоннелей метрополитена в г. Москве: Калининско-Солнцевская линия метрополитена на участке ст. «Третьяковская» – «Волхонка» – «Деловой центр»; Восточный участок Третьего пересадочного контура на участке ст. «Каширская» – ст. «Карачарово» и на участке от ст. «Кленовый бульвар» до площадки № 2 (двухпутный тоннель Ø10 м); Юго-Западный участок Третьего пересадочного контура на участке ст. «Проспект Вернадского» – ст. «Можайская». Суммарная протяженность устраненных водопроявлений через швы обделки составила более 4700 пог. м.

На основании собранной авторами статистики можно утверждать, что при использовании технологии нагнетания специальной однокомпонентной полиуретановой смолы за уплотнительный элемент блока обделки через игольчатый пакер, несмотря на относительно небольшой период применения (около 3 лет), возобновление водопроявлений через швы стыковых соединений блоков наблюдается не более чем на 10% протяженности отремонтированных ранее швов в обделке тоннелей. Вероятность отказа в устранении водопроявления, по мнению авторов, может быть связана или с наличием полостей в заобделочном пространстве, своевременно не заполненных тампонажным раствором в процессе проходки, или с низким выходом тампонажного камня с образо-

ванием в процессе набора прочности тампонажного раствора сообщающихся усадочных трещин и пустот, или с высоким коэффициентом фильтрации заобделочного грунтового массива наряду с движением грунтовых вод. Тем не менее технология устранения водопроявлений нагнетанием полиуретановой смолы за уплотнительный элемент блока обделки через игольчатый пакер на сегодня является более предпочтительной по совокупности временных, финансовых и качественных показателей результатов работы.

Разработанный подход, сочетание простой надежной конструкции игольчатого пакера, качественной пенополиуретановой смолы и многолетнего опыта ведения инъекционных работ позволили оперативно решить поставленную заказчиками задачу, качественно и надежно устранить протечки и места водопроявлений в тоннелях метрополитена.

### **Выводы**

В процессе сооружения транспортных тоннелей при нарушении технологии строительства и в результате внешних воздействий возможны нарушения водонепроницаемости колец тоннельной обделки.

Анализ применения широко используемой в настоящее время технологии устранения водопроявлений показал, что свыше 30% отремонтированных швов требуют повторного ремонта в течение гарантийного периода, который, как правило, составляет 5 лет.

Представленный способ совершенствования технологии производства ремонтных работ по восстановлению водонепроницаемости стыковых соединений и герметизации трещин в железобетонных блоках высокоточной обделки обеспечивает:

- снижение трудоемкости (экономия времени и отсутствие затрат на рас-

шивку швов и их чеканку вручную ремонтным материалом на цементной основе);

- значительное снижение точек инъектирования, что сокращает время ремонтных работ и материальные затраты на расходники;

- устойчивость к воздействию динамических нагрузок;

- сокращение расхода инъекционного материала и повышение эффективности инъекционных работ за счет непосредственного нагнетания в зону дефекта за уплотнительный контур блока обделки.

Анализ качества работ, выполненных с применением вышеизложенной технологии при строительстве тоннелей метрополитена в г. Москве (около 9 км), показал, что протяженность швов обделки, подлежащих ремонту, составила более 4700 пог. м, а возобновление водопроявлений наблюдается не более

чем на 10% выполненного объема ремонтных работ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО «Центр гидроизоляционных технологий» и лично генеральному директору К.А. Николаеву и главному инженеру Г.Н. Шляпкину за помощь в проведении обследований объектов, результаты которых использованы при подготовке публикации.

### **Вклад авторов**

Закоршменный И.М. — генерация идеи исследования; постановка задачи исследования; анализ результатов исследования и подготовка данных; написание текста статьи (50%).

Закоршменный А.И. — получение данных для анализа, выполнение работы по систематизации материала; анализ результатов исследования и подготовка данных (50%).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Cui J., Broere W., Lin D. Underground space utilisation for urban renewal // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108, article 103726. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103726.

2. Von Der Tann L., Sterling R., Zhou Y., Metje N. Systems approaches to urban underground space planning and management. A review // *Underground Space (China)*. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 144 – 166. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.03.003.

3. Guo D., Zhang C., Chen Z., Chen Y., Yang J., Tan Y. H. Planning and application of underground logistics systems in new cities and districts in China // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 113, article 103947. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103947.

4. Pleshko M., Pankratenko A., Revyakin A., Shchekina E., Kholodova S. New technology of underground structures the framework of restrained urban conditions // *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 33, article 02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302036.

5. *Закоршменный И. М., Федянин О. С.* Оценка влияния строительства тоннеля метрополитена с применением ТПМК на существующие объекты инфраструктуры / Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. — М: ИПКОН РАН, 2021. — С. 69 – 72.

6. Шейнин В. И., Блохин Д. И., Гайсин Р. М., Максимович И. Б., Максимович Ил. Б., Ходарев В. В. Комплексная диагностика технического состояния монолитной «стены в грунте» после длительной консервации // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. — 2014. — № 4. — С. 19 – 24. DOI: 10.1007/s11204-014-9277-5.

7. Мазеин С. В., Вознесенский А. С., Панкратенко А. Н., Шаршова Е. А. Улучшение технологических свойств грунта с помощью пенных реагентов в забое тоннельной буровой машины // *Горный журнал*. — 2019. — № 11. — С. 77 – 81. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.14.

8. Шейнин В. И., Дзагов А. М., Блохин Д. И., Смилянский А. Л. Оценка качества и прочности бетона с использованием данных ультразвуковых испытаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2012. — № 4. — С. 6–11. DOI: 10.1007/s11204-012-9179-3.

9. Шейнин В. И., Дзагов А. М., Костенко Е. С., Манжин А. П., Блохин Д. И., Максимович И. Б., Соболева В. Н. Определение прочностных характеристик бетона буровых свай по испытаниям образцов из выбуренного керна // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2016. — № 2. — С. 26–30. DOI: 10.1007/s11204-016-9374-8.

10. Валиев А. Г., Власов С. Н., Самойлов В. П. Современные щитовые машины с активным пригрузом забоя для проходки тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях. — М.: ТА Инжиниринг, 2003. — 70 с.

11. Xiangsheng Chen Research on combined construction technology for cross-subway tunnels in underground spaces // Engineering. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 103–111. DOI: 10.1016/j.eng.2017.08.001.

12. Потапова Е. В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков // Горные науки и технологии. — 2021. — № 6. — С. 52–60. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-52-60.

13. Yajie Xu, Xiangsheng Chen Quantitative analysis of spatial vitality and spatial characteristics of urban underground space (UUS) in metro area // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021, vol. 111, article 103875. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103875.

14. Смирнов Д. С., Рахимов Р. З., Габидуллин М. Г., Каюмов Р. А., Стоянов О. В. Испытания и прогнозная оценка долговечности уплотнительной резины герметизирующих стыков блоков обделки метро // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — № 15. — С. 141–146.

15. Kulikova E. Y., Ivannikov A. L. The terms of soils removal from the defects of the underground structures' lining // IOP Conference Series: Journal of Physics. 2020, vol. 1425, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012062.

16. Лебедев М. О. Обоснование выбора метода расчета напряженно-деформированного состояния крепей и обделок транспортных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 1. — С. 47–60. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-47-60.

17. Смирнова Г. О. Нормативная документация и порядок применения новых строительных материалов в метро- и тоннелестроении // Подземные горизонты. — 2019. — № 21. — С. 12–15.

18. Рахимов М. М., Рахимов Р. З. Метростроение и научное сопровождение строительства Казанского метрополитена // Известия КазГАСУ. — 2004. — № 1 (2). — С. 47–50.

19. Скопинцева О. В. Профилактический ремонт горных выработок как метод предупреждения отказов системы управления газовой выделением // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2–1. — С. 54–63. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-54-63.

20. Инструкция по устройству инъекционной гидроизоляции при строительстве и реконструкции зданий и сооружений. Методическое пособие. — М.: ФАУ «ФЦС», 2017. — 99 с.

21. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 962, no. 4, article 042020. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042020.

22. Куликова Е. Ю. Методические основы повышения эколого-технологической надежности городских подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6-1. — С. 176–185. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185.

23. Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом обеспечения совместимости материалов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ЦНИИС, 2010. — 182 с.

24. Jin-long Liu, Hamza Omar, Davies-Vollum K. Siân, Jie-qun Liu Repairing a shield tunnel damaged by secondary grouting // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 30, pp. 313–321. DOI: 10.1016/j.tust.2018.07.016. 

## REFERENCES

1. Cui J., Broere W., Lin D. Underground space utilisation for urban renewal. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108, article 103726. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103726.
2. Von Der Tann L., Sterling R., Zhou Y., Metje N. Systems approaches to urban underground space planning and management. A review. *Underground Space (China)*. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 144 – 166. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.03.003.
3. Guo D., Zhang C., Chen Z., Chen Y., Yang J., Tan Y. H. Planning and application of underground logistics systems in new cities and districts in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 113, article 103947. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103947.
4. Pleshko M., Pankratenko A., Revyakin A., Shchekina E., Kholodova S. New technology of underground structures the framework of restrained urban conditions. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 33, article 02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302036.
5. Zakorshmeny I. M., Fedyanin O. S. Assessment of the impact of a subway tunnel construction by TBM on existing infrastructure facilities. *Problemy osvoeniya nedr v XXI veke glazami molodyh. Materialy 15 Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov* [Problems of subsoil development in the XXI century through the eyes of the young. Materials of the 15th International Scientific School of Young Scientists and Specialists], Moscow, IPKON RAN, 2021, pp. 69 – 72. [In Russ].
6. Sheinin V. I., Blokhin D. I., Gaisin R. M., Maksimovich I. B., Khodarev V. V. Complex diagnostics of the technical condition of a monolithic «diaphragm-wall» after long-term conservation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2014, no. 4, pp. 19 – 24. [In Russ]. DOI: 10.1007/s11204-014-9277-5.
7. Mazein S. V., Voznesenskiy F. S., Pankratenko A. N., Sharshova E. A. Improvement of processing behavior of soil at the work face of tunnel boring machine using foam agents. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 11, pp. 77 – 81. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.14.
8. Sheinin V. I., Dzagov A. M., Blokhin D. I., Smilyanskiy A. L. Use of ultrasonic-test data for quality and strength evaluation of concrete. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012, no. 4, pp. 6 – 11. [In Russ]. DOI: 10.1007/s11204-012-9179-3.
9. Sheinin V. I., Dzagov A. M., Kostenko E. S., Manzhin A. P., Blokhin D. I., Maksimovich I. B., Soboleva V. N. Determining the strength characteristics of concrete in drilled piles from tests on extracted core specimens. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016, no. 2, pp. 26 – 30. [In Russ]. DOI: 10.1007/s11204-016-9374-8.
10. Valiev A. G., Vlasov S. N., Samoylov V. P. *Sovremennyye shchitovyye mashiny s aktivnym prigruzom zaboya dlya prokhodki tonneley v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [Modern shield machines with active face loading for tunneling in difficult engineering and geological conditions], Moscow, TA Inzhiniring, 2003, 70 p.
11. Xiangsheng Chen Research on combined construction technology for cross-subway tunnels in underground spaces. *Engineering*. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 103 – 111. DOI: 10.1016/j.eng.2017.08.001.
12. Potapova E. V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, no. 6, pp. 52 – 60. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-52-60.
13. Yajie Xu, Xiangsheng Chen Quantitative analysis of spatial vitality and spatial characteristics of urban underground space (UUS) in metro area. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 111, article 103875. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103875.
14. Smirnov D. S., Rahimov R. Z., Gabidullin M. G., Kayumov R. A., Stoyanov O. V. Testing and predictive assessment of the durability of sealing rubber of sealing joints of subway lining blocks. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014, no. 15, pp. 141 – 146. [In Russ].
15. Kulikova E. Y., Ivannikov A. L. The terms of soils removal from the defects of the underground structures' lining. *IOP Conference Series: Journal of Physics*. 2020, vol. 1425, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012062.

16. Lebedev M. O. Validation of choice of stress–strain analysis method for support and lining in traffic tunnels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 1, pp. 47 – 60. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-47-60.

17. Smirnova G. O. Normative documentation and the procedure for the use of new building materials in metro and tunnel construction. *Podzemnye gorizonty*. 2019, no. 21, pp. 12 – 15. [In Russ].

18. Rakhimov M. M., Rakhimov R. Z. Metro construction and scientific support for the construction of the Kazan metro. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2004, no. 1 (2), pp. 47 – 50. [In Russ].

19. Skopintseva O. V. Preventive repair of mining works as a method for preventing failures in the gas control system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2–1, pp. 54 – 63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-54-63.

20. *Instruktsiya po ustroystvu in "ekstionnoy gidroizolyatsii pri stroitel'stve i rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy*. Metodicheskoe posobie [Instructions for the installation of injection waterproofing during the construction and reconstruction of buildings and structures. Toolkit], Moscow, FAU «FTSS», 2017, 99 p.

21. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 962, no. 4, article 042020. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042020.

22. Kulikova E. Yu. Methodical principles for improving the ecological and technological reliability of urban underground structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6-1, pp. 176 – 185. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185.

23. *Rukovodstvo po remontu betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktivnykh transportnykh sooruzheniy s uchetom obespecheniya sovmestimosti materialov*. 2-e izd. [Guidelines for the repair of concrete and reinforced concrete structures of transport structures, taking into account the compatibility of materials, 2nd edition], Moscow, TsNIIS, 2010, 182 p.

24. Jin-long Liu, Hamza Omar, Davies-Vollum K. Siân, Jie-qun Liu Repairing a shield tunnel damaged by secondary grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 30, pp. 313 – 321. DOI: 10.1016/j.tust.2018.07.016.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Закоршменный Иосиф Михайлович* – д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН, e-mail: zakorshmenniy\_i@ipkonran.ru, ORCID ID: 0000-0001-9153-673X,

*Закоршменный Андрей Иосифович* – канд. техн. наук, главный специалист службы качества, АО «Мосметрострой», e-mail: zakman008@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6004-2558.

**Для контактов:** *Закоршменный И.М.*, e-mail: zakorshmenniy\_i@ipkonran.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*I.M. Zakorshmennyi*, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Researcher, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia, e-mail: zakorshmenniy\_i@ipkonran.ru, ORCID ID: 0000-0001-9153-673X,

*A.I. Zakorshmennyi*, Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist of Quality Service, Mosmetrostroy JSC, 127051, Moscow, Russia, e-mail: zakman008@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6004-2558.

**Corresponding author:** *I.M. Zakorshmennyi*, e-mail: zakorshmenniy\_i@ipkonran.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 18.02.2022; принята к печати 10.03.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 18.02.2022; accepted for printing 10.03.2022.