DOI: 10.34831/EP.2023.60.86.002

Создание противофильтрационных устройств в грунтах методом пропитки гидроструктурной смолой на акрилатной основе

Михайлов М. Е.[1], ведущий менеджер по работе
с проектными сегментами энергетики и ГТС,
Козьмин А. Д.[2] (ООО “Эм-Си Баухеми”)

Приводятся сведения о применении метода пропитки гидроструктурной смолой на акрилатной основе для уплотнения швов, создания противофильтрационных завес в скальных и полускальных грунтах и противофильтрационных устройств дисперсных несвязных грунтов грунтовой плотины.

Ключевые слова: противофильтрационные устройства, гидроструктурный гидрогель на акрилатной основе, глубинное инъецирование швов, грунтовые плотины.

Creation of an anti-filtration curtain in soils by impregnation with an acrylate-based hydrostructural resin

Mikhailov M. E.[1], Kozmin A. D.[2] (MC-Bauchemie)

Information is given on the application of the method of impregnation with hydrostructural resin on an acrylate basis for sealing joints, creating an anti-filtration curtain in rocky and semi-horizontal soils and an anti-filtration curtain of dispersed disconnected soils of a soil dam.

Keywords: anti-filtration curtain, hydrostructural acrylate-based hydrogel, deep injection of joints, ground dams.

Одно из ключевых требований для грунтовых плотин — их долговечность. В истории строительства плотин в России есть примеры таких долговечных сооружений. Например, действующая грунтовая Змеиногорская плотина (Алтай), возведённая К. Д. Фроловым в 1786 г. Эта плотина имеет высоту 18,0 м и выполнена из маловодопроницаемого грунта — суглинка.

Грунтовые плотины — это наиболее распространённые водоподпорные гидротехнические сооружения. По способу возведения грунтовые плотины подразделяются на насыпные, намывные и полунамывные. Они выполняются из мелкозернистых глинистых, песчаных и песчано-гравелистых грунтов с однородными и неоднородными типами конструкций. Однородные плотины строятся, как правило, без дополнительных противофильтрационных устройств.

Неоднородные выполняются с противофильтрационными устройствами в виде центрального ядра или наклонного ядра из грунтовых материалов (глины, суглинков).

Для уменьшения фильтрационных расходов через тело плотины предусматривают противофильтрационные устройства (ПФУ) из негрунтовых материалов (бетон, асфальтобетон, сталь, дерево, глиноцементобетон, грунтополимер). Эти материалы применяются в виде экранов со стороны верхового откоса и диафрагм, расположенных по оси плотины.

ПФУ повышают устойчивость низового откоса, предотвращают возможности пучения грунта при промерзании. ПФУ из негрунтовых материалов выполняются по технологии “стена в грунте” и могут быть возведены различными способами: в виде шпунтовых, траншейных технологий, устройством буросекущих свай (БСС), струйной цементации и пропитки грунта полимерными составами. Выбор способа выполнения зависит от типа сооружений, воздействий напорной воды и условий эксплуатации. Вышеперечисленные способы широко применяются в гидротехническом строительстве. В данном контексте обращено внимание на метод пропитки грунтов.

Метод пропитки — это один из способов химического закрепления пор грунта инъекционными растворами. Он описан в СП 45.13330.2012 как нагнетание под давлением водных растворов полимеров неорганических и органических смол, а также растворов на основе кремнезёмов, акрилатов и полиуретанов [1]. К ним относятся силикатизация, смолизация, цементация, битумизация и пропитка растворами на акрилатной основе.

Способ силикатизации, разработанный Б. А. Ржаницыным, как один из первых методов химического закрепления был применён в 1933 г. В отличие от цементации использовались чистые растворы, а не суспензии. Сущность метода заключа-

[1] Mikhail. Mikhailov@mc-bauchemie.ru
[2] Andrey.koz@mail.ru

лась в нагнетании через металлические трубки двух химических растворов — жидкого стекла и хлористого кальция; в результате химической реакции от 1 до 24 ч образовывался гидрогель кремневой кислоты, который увеличивал механическую прочность грунта от 1 – 5 МПа и соответственно увеличивалась водонепроницаемость. В последствии был разработан однорастворный способ для закрепления доломитовой муки, залегающей в рыхлом, сыпучем состоянии.

Способ химического закрепления в 40-е гг. XX в. считался самым передовым для песчаных грунтов и был использован для создания противофильтрационной перемычки правого устоя Магнитогорской плотины в песчано-гравелистых грунтах, что позволило снизить скорость фильтрации в 28 раз. При строительстве первой очереди Московского метрополитена была выполнена силикатизация грунта с закреплением около 20 000 м^3 [3]. Силикатизация была выполнена для возведения ряда водонепроницаемых завес при строительстве сооружений канала Москва — Волга довоенного периода [2]. Экспериментальным путём в период 1931 – 1940 гг. профессор Б. А. Ржаницын получил критерии проницаемости грунтов по коэффициенту фильтрации при нагнетании растворов (табл. 1).

В табл. 2 приведены обобщённые выводы, основанные на эмпирическом опыте применения инъекционных растворов в разных странах. Они могут различаться в некоторых деталях, но отражают общую тенденцию для инъекционных растворов [4].

В представленных выше данных группа растворов из акриламидов имеет самую высокую проницаемость в грунтах. Акриламиды начали выпускать в 1950 г. Использовались в сочетании с жидким стеклом, коллоидными суспензиями и битумными эмульсиями. Акрилатные инъекционные растворы разработаны в 1980 г. как замена токсичным акриламидам [4].

Таблица 1

Критерии применения по коэффициенту фильтрации

Способ закрепления	Критерии применения
Силикатизация	С коэффициентом фильтрации 2 – 80 м/сут
Битумизация (холодная)	С коэффициентом фильтрации 10 – 100 м/сут
Электрохимический	С коэффициентом фильтрации < 1 м/сут
Цементация	Трещиноватые горные породы, трещины > 0,5 мм
Глинизация	С коэффициентом фильтрации < 10 м/сут
Битумизация (горячая)	С коэффициентом фильтрации 10 – 100 м/сут

Большинство специалистов указывают, что проницаемость дисперсных грунтов зависит от гранулометрического состава и коэффициента фильтрации, а для скальных трещиноватых грунтов — от ширины раскрытия трещин и удельного водопоглощения.

Из опыта известно, что применение цементации в несвязных грунтах и трещиноватых скальных основаниях становится затруднительным и малоэффективным, если в породе преобладает трещиноватость с раскрытием менее 0,5 мм и пористостью до 0,8 мм.

Способ цементации широко применим для укрепления грунтов, но не применим для аллювиальных грунтов, имеющих коэффициент фильтрации 80 м/сут. Частично эта проблема была решена за счёт добавления цементно-глинистых тампонажных растворов путём введения в них бентонитовых глин.

В 1940 г. были начаты исследования по разработке высокодисперсных тампонажных глиносиликатных и алюмосиликатных растворов для определения области применимости растворов в грунтах. Были получены результаты при пропитке алллювиальных грунтов глиносиликатными растворами с коэффициентом фильтрации 80 – 30 м/сут, бентонитосиликатными растворами 30 – 5 м/сут, алюмосиликатными 5 – 0,5 м/сут. Полученные результаты легли в основу проекта института “Гидроспецпроект” для Асуанской плотины (Египет), который реализовался в 1970 г. При создании противофильтрационной завесы было закреплено методом пропитки 1665 тыс. м^3 грунта. Для нагнетания раствора было пробурено более 3 тыс. инъекционных скважин с объёмом бурения 335 тыс. м и было введено в грунт 670 тыс. м^3 глиносиликатных растворов. Этот проект вошел в мировую практику химического закрепления грунта гидротехнического строительства.

Способ смолизации также внедрялся для закрепления грунтов в строительстве. Так, в период с 1958 по 1973 г. было закреплено более 30 тыс. м^3 грунта. Примером выполненных проектов служат известные объекты, такие, как Московский вокзал и малый зал Филармонии г. Санкт-Петербурга, опытно-производственные работы по восстановлению противофильтрационной завесы Камской ГЭС [5].

Способы химического закрепления грунта инъекционными методами отражены в пособии НИОСП им. Н. М. Герсеванова 1986 г. В пособии также отмечено, что недостатком смолизации является выделение карбамидными смолами токсичного формальдегида [6]. При силикатизации происходит

Таблица 2

Проницаемость инъекционных растворов



защелачивание грунтов. Эти способы с применением жидкого стекла, слабых растворов кислот и карбамидных смол влияют на экологический аспект грунтовых вод. Практика силикатизации и смолизации широко применима в строительстве. Для выполнения работ используются забивные инъекторы при помощи молотов и гидродомкратов. В условиях обводнённых грунтов с коэффициентом фильтрации до 1 м/сут нагнетается жидкое стекло сверху вниз, а затем раствором хлористого кальция снизу вверх, так же при скорости более 3 м/сут выполняется уже в две очереди. Эти процессы подразумевают применение крупногабаритных машин и механизмов, станцию приготовления растворов. Все эти процессы влияют на скорость проведение работ.

Европейский опыт по химическому закреплению грунтов оформлен стандартом EN 12715: 2000 [7], который регламентирует основные принципы и методы при выполнении специальных геотехнических работ при режимах пропитки грунта. Для режима пропитки применяются растворы. При описании применения силикатизации обращено внимание, что данные растворы нестабильны и их применение может приводить к росту микроорганизмов в грунте. Для метода пропитки предлагаются растворы (смолы) на акрилатной основе для уменьшения водопроницаемости и повышения прочности. Также предлагаются полимеры на полиуретановой, фенольной и эпоксидной основах.

Приведённые выше способы химического закрепления грунта для применения метода пропитки растворов используют металлические забивные трубки и насосы для нагнетания. С развитием строительной химии появились растворы, обладающие низкой вязкостью, регулируемой скоростью реакции и требующие мобильного инъекционного оборудования. В рамках сокращения времени при производстве работ по устройству ПФУ в грунтах перед специалистами гидротехнического строительства стоит задача повышения эффективности и поиска новых способов. Известные технологии в виде шпунтовых, траншейных технологий, устройства буросекущих свай (БСС), струйной цементации и пропитки грунта в ряде случаев не обеспечивают и не решают ряд поставленных задач.

Применение гидроструктурной смолы на акрилатной основе позволяет преодолеть данные ограничения и по-другому посмотреть на создание ПФУ в грунтах. Особо можно отметить, что применение данного типа составов позволяет достигать инертности инъецируемого полимера после окончания реакции как по отношению к грунтам, так и по отношению к растворам солей и минералов в грунтах, не считая самой влаги. После полимеризации гидрогель химически, как правило, не связан с вмещаемой горной породой, образуя инертную матрицу, что обеспечивает длительный срок эксплуатации и сохраняемость достигнутых свойств.

Гидроструктурная смола на акрилатной основе (гидрогель) имеет большую область применения для решения задач по созданию противофильтрационных устройств в грунтах и для герметизации швов гидросооружений. Гидрогель применим в дисперсных несвязных и связных грунтах с коэффициентом фильтрации до $1 \cdot 10^{-7}$ м/с, а также применим для галечниковых и гравийных грунтов. В то же время гидрогель не применим с торфянистыми грунтами и с валунами размером более 0,2 м (с содержанием в грунте более 30 %).

Опыт применения гидрогеля для уплотнения швов реализован на Воткинской ГЭС. Предварительно, до начала нагнетания гидрогеля, шов заполнялся щебнем фракцией 5 – 20 мм на всю высо-



а) *б*)

Рис. 1. Фильтрация 30 л/с шва 1 – 2 секции в 2016 г. (*а*) и состояние после в 2020 г. (*б*), после 4 лет эксплуатации

ту. Затем через перфорированную обсадную трубу нагнетался гидрогель. Подобная технология реализована на Усть-Каменогорском шлюзе, где для гидроизоляции шва применён гидрогель и щебень с фракцией 5 – 20 мм. Щебень был уложен в шов со стороны напорного фронта и прижат "Омега" профилем, в последствии нагнетался гидрогель. Была подавлена фильтрация 17 л/с в шве со стороны речного устоя контрфорсного порога.

Опыт применения гидрогеля для уплотнения швов. Опыт применения гидрогелей при выполнении работ по гидроизоляции деформационных швов демонстрирует свою эффективность. Был применён на Светогорской ГЭС, Саяно-Шушенской ГЭС, Майнской ГЭС, Нижне-Бурейской ГЭС, Воткинской ГЭС, Кривопрожской ГЭС, Ондской ГЭС, Маткожненской ГЭС, Верхне-Свирском шлюзе, Усть-Каменогорском шлюзе (Казахстан), ГЭС Тишрин (Сирия), ГЭС Иффецхайм (Германия).

Успешный опыт АО "Институт Гидропроект" на ГЭС "Тишрин" на р. Евфрат (Сирийская Арабская Республика) демонстрирует способ восстановления водонепроницаемости межсекционного деформационного шва, выполненного методом глубинного инъецирования. Предварительно было выполнено бурение шва диаметром 132 мм на глубину 44,0 м и нагнетание в шов гидрогеля. После выполнения работ расход составил 0,03 л/с, первоначально он составлял 17,5 л/с, фильтрация уменьшилась и стала практически нулевой. [8].

На примере реализованного проекта по глубинному инъецированию шва на Верхне-Свирском шлюзе [9] была решена задача по устранению фильтрации воды в шве секции 1 – 2. Основной очаг фильтрации воды с расходом 30 л/с находился на нижней отметке шва (рис. 1). Для достижения результата было предусмотрено воссоздание новой полимерной шпонки методом глубинного инъецирования. Предварительно с верхней отметки было выполнено бурение шва диаметром 132 мм на глубину 26 м по вертикали шва, между битумным колодцем и ремонтной скважиной. В пробуренную скважину до полезного горизонта опускался двухкомпонентный разжимной многоразовый инъекционный пакер и каждые 2 м выполнялось нагнетание гидроструктурной смолой на акрилатной основе. На рис. 1 представлено состояние шва после 4 лет эксплуатации, как видно без очагов фильтрации [10].

Представленная технология отработана на разных объектах с глубиной бурения скважин от 10 до 40 м и выполнено более 50 швов за период с 2010 по 2021 г.

Применение гидрогеля для скального основания. Технология глубинного инъецировая швов на ГТС применима для создания противофильтрационных завес для скальных и полускальных грунтов. Учитывая, что скальное основание, как правило, имеет высокую трещиноватость, применение гидрогеля позволит выполнить притивофильтрационную завесу в трещинах с раскрытием до 0,01 мм. Предварительно выполняется бурение скального основания диаметром от 110 до 132 мм на заданную глубину. Инъекционная линия состоит из спаренных двухкомпонентных насосов, присоединённых к шлангам высокого давления двухкомпонентного пакера. Пропитка трещиноватого грунта производится восходящим потоком с интервалом установки раздувного пакера в скважине каждые 2 м с последующим подъёмом.

Метод пропитки несвязных грунтов. Структура грунта имеет трёхфазную основу (частицы, воздух и вода). При пропитке происходит вытеснение воды и воздуха и заполнение пор гидроструктурной смолой в условиях естественного залегания без разрушения их структуры.

В своей работе [11] В. А. Флорин указывает, что выполненными расчётами установлено, что суммарная площадь поверхностей твёрдых частиц в 1 $см^3$ грунта при размере частиц около 1 мм составляет 60 $см^2$, а при размере частиц 0,001 мм она уже равна 6 $м^2$. Соответственно свободной воды в по-

следнем случае в гидратных и диффузных глинистых слоях значительно меньше, чем в песках.

В работе [12] Н. А. Цытович упоминает, что тонкие слои воды, по проф. Б. А. Дерягину, обладают значительной упругостью при сдвиге. Так, при толщине пленки 0,15 микрон модуль сдвига близок к нулю, но при толщине 0,089 микрон он уже равен 193 кгс/см^2.

Из этих суждений, возможно, следует, что метод пропитки актуален для связывания свободной воды в порах и диффузных слоях, что увеличит несущую способность основания. Гидрогели до полимеризации отличаются стабильной низкой вязкостью порядка 2,5 – 5 мПа · с, что обеспечивает высокую пропитывающую способность грунтов с коэффициентом фильтрации до $1 \cdot 10^{-7}$ м/с.

Применение гидрогеля целесообразно для метода пропитки и является экологически безопасным. При производстве работ используется мобильное оборудование, которое позволит оптимизировать выполнение работ в сжатые сроки.

В современном строительстве уже реализован новый метод пропитки грунта, отличающийся использованием забивных составных металлических пик малого диаметра (от 14 до 26 мм), с теряемым наконечником и пропиткой гидрогеля. Нагнетание производится восходящим потоком с постепенным подъёмом пики из нижней отметки до требуемой, согласно установленному режиму выполнения работ и геологических условий.

Гидрогели представляют собой многокомпонентные композиции, которые предварительно приготавливаются на объекте с учётом требуемых параметров из субкомпонентов в заданных пропорциях.

Преимуществом данного вида пропитки гидрогелем перед цементацией и силикатизацией является точная настройка скорости реакции (полимеризации) материала. Есть возможность также ориентироваться на изменчивость геологических условий, в том числе, в процессе производства работ.

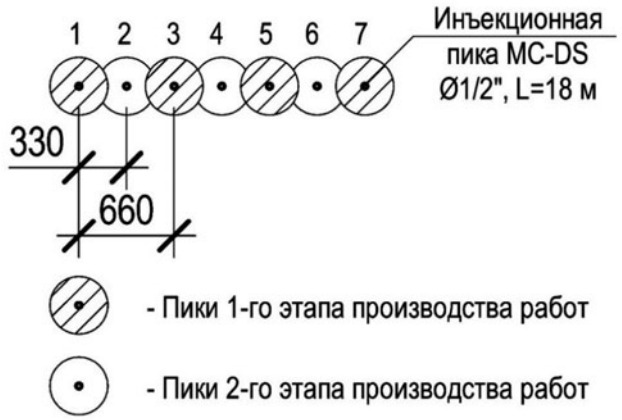
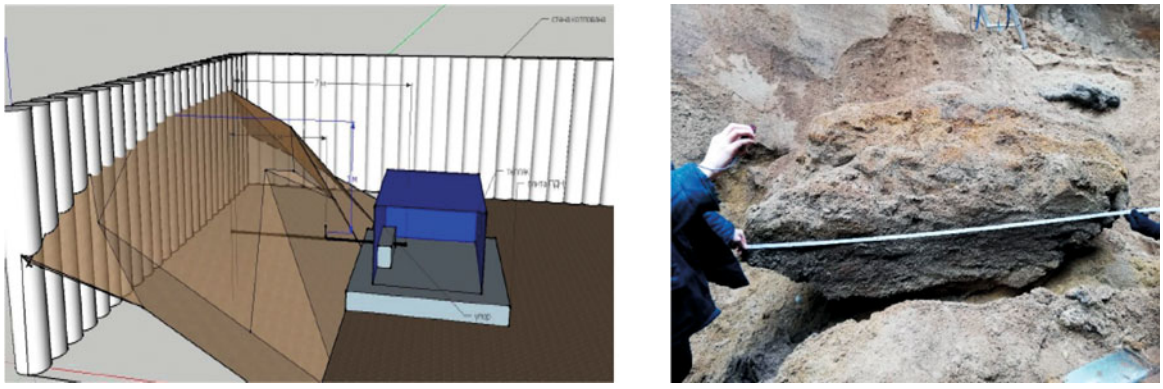


Рис. 2. Схема расположения скважин

Нагнетание производится насосами по двухкомпонентной линии со смешением компонентов перед подачей в инъекционную пику, что позволяет выполнять работы гидрогелем со скоростью реакции менее 5 мин и, в свою очередь, обеспечивает контроль распространение материала в грунте. Для выполнения работ в условиях напорной фильтрующей воды скорость реакции может быть снижена до минимальных 14 с.

Гидрогель нагнетается с ограниченным давлением до 2 МПа, это позволяет избежать гидроразрыва. Из-за давления материал распространяется по окружности и пропитывает грунт. Инъекционные пики погружаются вертикально или наклонно на глубину до 20 м. Расстояние между скважинами зависит от типа грунта, коэффициента фильтрации и пористости. В среднем расстояние составляет 300 – 350 мм по фронту, на рис. 2 представлена схема расположения инъекционных скважин.

При выполнении нагнетания в теле грунта формируются консолидируемые водонепроницаемые колонны из грунтополимера диаметром до 350 – 400 мм, стойкие к деформационным и фильтрационным нагрузкам (при давлении столба воды до 50 м). Также в зоне контакта колонн и воды произойдёт ограниченное разбухание грунтополимера,



а) *б*)

Рис. 3. Трёхмерная визуализация участка пробного (*а*) и результат закреплённого грунта (*б*)

что обеспечит герметичность колонн. После выполнения инъекционных работ будет сформирована “стена в грунте” из грунта полимера.

По данной технологии были успешно выполнены работы по закреплению грунта на объекте строительства подземного перехода между станциями метро в г. Минске. После откопки опытного участка был зафиксирован закреплённый массив грунта размером в габаритах 2 × 3 × 0,8 м, полученный в результате пропитки одной инъекционной пики в горизонтальном расположении (рис. 3). На основании данных опытных работ была предложена схема расстановки инъекционных пик с последующей их пропитывающей инъекцией гидрогелем производства MC-Bauchemie на глубину до 15 м. Вскрытие показало, что в результате выполненных работ был сформирован единый связанный массив, который позволил выполнить проходческие работы ручным способом без дополнительных защитных мероприятий.

Данная технология успешно применена на Шульбинском шлюзе в 2020 и 2021 гг., который находится на р. Иртыше в Республике Казахстан. Стояла задача по созданию “стены в грунте” из грунтополимера в обратной засыпке техногенных грунтов. ПФУ выполнялось на глубине 10 м методом пропитки гидрогеля через инъекционные пики. После мониторинга 2 лет эксплуатации шлюза перемещение стенок шлюза остановилось и они находятся в проектных отметках.

Выводы

1. Противофильтрационные устройства в грунтовых плотинах могут быть выполнены по технологии “стена в грунте” из негрунтовых материалов и возведены различными способами: в виде шпунтовых, траншейных технологий, устройством буросекущих свай, струйной цементации и пропитки грунта полимерными составами. Метод пропитки гидроструктурной смолой на акрилатной основе имеет высокую проникающую способность в грунтах с коэффициентом фильтрации до $1 \cdot 10^{-7}$ м/с. Применим в различных элементах конструкций гидротехнических сооружений в виде противофильтрационных элементов в деформационных швах, скальных и несвязных грунтовых основаниях.

2. Метод пропитки гидроструктурной смолой на акрилатной основе является мобильным и эффективным методом в сложных условиях и при ограниченных сроках. Он также результативен, если необходимо закрепление грунта, создание противофильтрационных устройств в грунтовых плотинах, находящихся под напором. Метод является перспективным для ремонтных работ и незаслуженно не нашёл широкого применения. Несмотря на имеющийся положительный опыт применения, метод пропитки гидроструктурной смолой на акрилатной основе требует дополнительного научного изучения в области уточнения критериев его фильтрационной прочности в зависимости от действующих напоров для различных грунтов.

Список литературы

1. *СП 45.13330.2012*. Земляные сооружения, основания и фундаменты.
2. *Ржаницын Б. А.* Сравнительная характеристика способов закрепления грунтов и горных пород // Совещание по закреплению грунтов. — М.: Академия наук СССР, 1941. С. 11.
3. *Ржаницын Ю. А.* Химические закрепления (силикатирование) грунтов и бетона // Совещание по закреплению грунтов. — М.: Академия наук СССР, 1941. С. 41.
4. *Самарин Е. Н.* Кислотно-основная буферность дисперсных грунтов как основа физико-механического регулирования вяжущих их поглотительной способности. — М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2017.
5. *Ржаницын Б. А.* Некоторые итоги работ в области химического закрепления грунтов // Материалы VIII Всесоюзного совещания закрепления и уплотнения грунтов. — Киев: Издательство Будивельник, 1974. С. 99 – 111.
6. *Пособие* по химическому закреплению грунтов инъекций в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01.83) / НИОСП им. Н. М. Герсеванова. 1986. С. 20.
7. *Европейский* стандарт EN 12715: 2000. DIN 12715. Выполнение специальных геотехнических работ. 2000.
8. *Волгин Н. А.*, *Ситнин О. О.*, *Харитонов М. Е.*, *Павлов А. П.* Предложение по использованию инновационных технологий и материалов при реконструкции Угличской, Рыбинской и Жигулевской ГЭС // 12 научно-техническая конференция “Гидротехника. Гидроэнергетика”: Тезисы докладов. — Санкт-Петербург, 2018. С. 51.
9. *Захарьин Е. Н.* Опыт применения инъекционной технологии деформационных швов массивных конструкций // 12 научно-техническая конференция “Гидротехника. Гидроэнергетика”: Тезисы докладов. — Санкт-Петербург, 2018. С. 83.
10. *Михайлов М. Е.* Опыт воссоздания полимерной шпонки ТОШ ГТС // Гидротехника 21 век. 2020. № 5.
11. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов. — Л.,1959. Т. 1. С. 17.
12. *Цытович Н. А.* Механика грунтов. — М.,1963. С. 150.
13. *СТО 51552155-302-2016*. Ремонт и защита бетонных конструкций методом инъецирования. — М., 2016. С. 20.