

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.1:551.3

ВОДОПОНИЖЕНИЕ КАК ВЕДУЩИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ СУФФОЗИИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

© 2023 г. П. И. Кашперюк^{1,*}, Д. С. Москалев^{2,**}, В. П. Хоменко^{1,***}

¹ФГБУ ВО “Национальный исследовательский университет
Московский государственный строительный университет” (НИУ МГСУ),
Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия

²Научно-производственная фирма “Специальные изыскания для высотного строительства”,
ул. Архитектора Власова, 45А, Москва, 117393 Россия

*E-mail: npf-sivs@yandex.ru

**E-mail: cangaro@mail.ru

***E-mail: khomenko_geol@mail.ru

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

После доработки 26.04.2023 г.

Принята к публикации 04.05.2023 г.

В статье рассмотрены основные техногенные факторы, приводящие к развитию механической суффозии в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений с глубоким заложением фундаментов. На конкретном объекте исследованы причины и динамика развития восходящего суффозионного процесса “вулканического” характера (“псевдовулканической суффозии”). Установлено, что основными факторами, обусловившими развитие суффозионного процесса являются постоянные откачки поступающих в дренажную систему напорных вод, находящихся в активной зоне основания сооружения, и систематически поддерживаемый высокий гидравлический градиент. Доказывается, что необходимость постоянного водопонижения, поступающих в дренажную систему подземных вод, связана не с качественными дефектами сооруженного противофильтрационного экрана – “стены в грунте”, а с нарушением сплошности толщи верхнего водоупора, являющегося непосредственным грунтом основания, при производстве строительных работ самой “стены в грунте” и свайных фундаментов. Результаты исследований позволили впервые оценить возможности применения двух методов определения развития процесса восходящей суффозии во времени: измерения скважностей каверномером и определения объема вертикальных пустот методом их засыпки песком. На основе законов гидродинамики сделана попытка определения скорости движения восходящего потока и величины гидродинамического напора. Отмечается, что важнейшим условием производства инженерных изысканий, при выявлении в грунтах основания межпластовых высоконапорных водоносных горизонтов, должно являться обязательное тампонирующее разведочных скважин высокомарочным бетонным раствором в интервале глубин залегания подошвы верхнего водоупора и, как минимум, проектной отметки дна котлована, сразу после окончания бурения скважин до организации мероприятий по водопонижению.

Ключевые слова: механическая суффозия, псевдовулканическая суффозия, связный и несвязный грунты, градиент напора, фильтрационный поток, размываемость грунтов, водопонижение, вертикальный противофильтрационный экран, коррозия

DOI: 10.31857/S0869780923030049, EDN: WMOLHF

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство заглубленных подземных сооружений, как правило, основывается на необходимости осуществления водопонижения приповерхностных подземных вод в период производства строительных работ, а в отдельных случаях и при эксплуатации сооружений. Основным конструктивным решением для защиты разрабатываемых котлованов от водопритоков в них подземных вод является возведение “стены в

грунте”. Реализация проектного решения по строительству “совершенного” вертикального противофильтрационного экрана предполагает исключение естественного повышения уровня подземных вод в пределах площади котлована. Однако практика строительства вертикальных противофильтрационных экранов свидетельствует, что “стена в грунте” во многих случаях не обеспечивает надежной гидроизоляции.

Дефекты экранирования котлованов от поступления грунтовых и межпластовых безнапор-

ных вод связаны исключительно с несовершенством технологий возведения “стены в грунте”, допускающих возможность протечек подземных вод сквозь бетонное ограждение, т.е. обусловлены качеством их строительства. В связи с этим, в зависимости от геологического строения участков, для устранения возможных протечек “стены в грунте” в период эксплуатации сооружения проектировщики предусматривают дополнительное строительство вертикального пристенного дренажа, часто совмещая его с пластовым. Такие проектные решения в большинстве случаев предполагают систематическую откачку подземных вод из дренажной системы в течение всего периода эксплуатации сооружения, что в конечном итоге значительно повышает эксплуатационные расходы.

Аналогичные проектные решения были реализованы на недостроенном жилом комплексе в районе станции метро “Юго-западная” в Москве. Его строительство было приостановлено в 2008 г. из-за необходимости откачки более чем 320 м³/сут воды из пластового дренажа с глубины 13.0 м. Подземная часть здания и инженерно-геологический разрез участка показаны на рис. 1.

На представленном инженерно-геологическом разрезе выделяются два слоя четвертичных водно-ледниковых супесчано-песчаных, песчаных и дресвяно-щебнистых отложений. Верхний из них представлен среднечетвертичными водно-ледниковыми песками мелкими, средней плотности, водонасыщенными, с прослоями и линзами супеси песчанистой и залегает на глубинах 3.7–7.3 м. По гранулометрическому составу пески неоднородны, коэффициенты их неоднородности варьируют в пределах 3.1–8.0, по степени суффозионности они в целом не суффозионные. Учитывая незначительную мощность песков (0–2.2 м), их невыдержанность (прерывистость) по простиранию, маломощность грунтовых вод (не более 2.4 м), низкие значения возможных гидравлических градиентов и низкие значения коэффициентов фильтрации (0.8–2.8 м/сут), вероятность проявления суффозии в этих песках оценивается как весьма низкая.

Что касается второго (нижнего) слоя водовмещающих нижнечетвертичных водно-ледниковых и озерно-ледниковых песков различной крупности (мелких, средней крупности, местами крупных и гравелистых), а также дресвяно-щебнистых грунтов с песчаным заполнителем, перекрытых мощной толщей (10.0–17.2 м) моренных суглинков, то для них также характерна значительная неоднородность по гранулометрическому составу, и они являются потенциально суффозионно неустойчивыми. При этом пески средней крупности и пылеватые являются слабосуффозионны-

ми, а дресвяно-щебнистые грунты – сильно суффозионными.

Однако, учитывая глубины залегания (19.0–21.0 м от поверхности земли) этих грунтов, наличие толщи перекрывающих водонепроницаемых моренных суглинков (5.0–13.0 м ниже дна котлована), значительные отметки пьезометрического уровня водоносного горизонта (до 170.0 м), следовательно, и малую вероятность естественного возникновения значительных гидравлических градиентов, формирование естественного суффозионного процесса в этих грунтах также маловероятно.

Предложенный авторами состав изысканий и выполненный на объекте комплекс инженерно-геологических исследований позволили установить причины интенсивного затопления подземной части здания, выявить условия активного развития восходящего суффозионного процесса “вулканического” характера и оценить его динамику.

УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ СУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Как показано на рис. 1, в сформировавшихся техногенных условиях при систематической откачке подземных вод из дренажной системы глубокого заложения создаются все необходимые условия для активного развития суффозионных процессов. На основании публикаций таких известных исследователей, как В.П. Хоменко, А.В. Аникеев, А.Д. Кочев, С.В. Щербаков и др. [1–4, 6, 8, 10, 11] становится очевидным, что для образования суффозионных деформаций необходима реализация следующих условий:

– присутствие в геологическом разрезе обводненных неоднородных по гранулометрическому составу несвязных грунтов;

– высокие значения гидравлического градиента и гидродинамического воздействия подземных природных или техногенных вод, движущихся со скоростью, достаточной для размывания и выноса наиболее мелких частиц из несвязных грунтов;

– наличие свободного пространства, в которое может аккумулироваться разрушенный механической суффозией материал.

В рассматриваемом случае при разработке глубокого котлована внутри “стен в грунте” все перечисленные выше условия реализуются, при этом, как правило, имеют место значительные, связанные с глубиной котлована, величины гидростатических и гидродинамических давлений, а местом аккумуляции вымываемых и переносимых частиц грунта является щебнисто-дресвяная толща пластового дренажа.

В данной ситуации имеет место по-своему уникальный феномен суффозионного разруше-

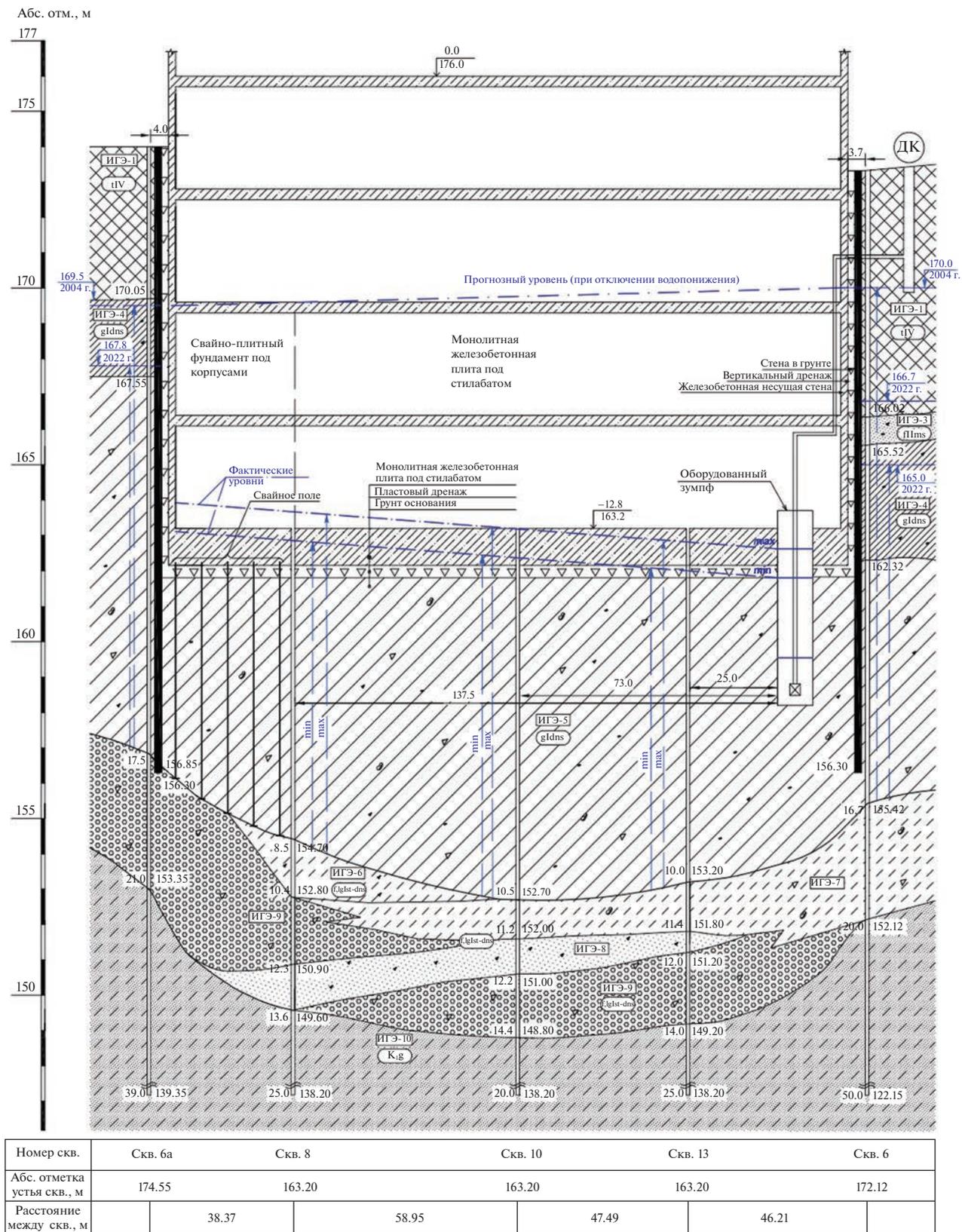


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез площадки строящегося здания.

Условные обозначения

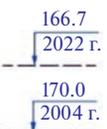
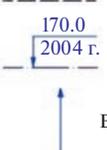
tIV		ИГЭ-1	Насыпной грунт – суглинок легкий песчанистый, темно-серый, тугопластичный, и песок различной крупности, рыхлый местами средней плотности, влажный и водонасыщенный, с включениями щебня и гравия, щепы древесины, обломков бетона, крошки кирпича. Местами на различных глубинах встречаются крупные обломки железобетонных блоков и плит. Насыпь слежавшаяся
fIIms		ИГЭ-3	Песок мелкий, прослоями средней крупности, местами пылеватый, неоднородный, средней плотности, водонасыщенный, редко в верхней части слоя влажный, коричнево-серый и буровато-серый, с включениями до 20% дресвы и гравия
gIdns		ИГЭ-4	Суглинок легкий песчанистый, тугопластичный, прослоями полутвердый, буровато-коричневый, ненабухающий, среднепучинистый, с включениями гравия, дресвы и щебня 5–10%, с гнездами и линзами песка мелкого и средней крупности, плотного, влажного и водонасыщенного
gIdns		ИГЭ-5	Суглинок легкий песчанистый, полутвердый, прослоями тугопластичный, местами в нижней части слоя твердый, коричнево-серый, ненабухающий, среднепучинистый, с включениями гравия, дресвы и щебня 5–10%, с гнездами и линзами песка мелкого и средней крупности, плотного, влажного и водонасыщенного
f,lgIst-dns		ИГЭ-6	Суглинок тяжелый пылеватый, прослоями до глины легкой, преимущественно тугопластичный, местами в нижней части слоя мягкопластичной консистенции, темно-серый, с частыми черными (углистыми) примазками, ненабухающий, сильнопучинистый, с прослойками песка разной крупности, плотного, влажного
f,lgIst-dns		ИГЭ-7	Супесь песчанистая, пластичная, прослоями до текучей, желтовато-коричневая, с прослоями толщиной до 1.5–2 см песка пылеватого, плотного, водонасыщенного и суглинка легкого, песчанистого, мягкопластичного
f,lgIst-dns		ИГЭ-8	Песок средней крупности, местами мелкий, плотный, прослоями средней плотности, водонасыщенный, серый, с тонкими прослойками и комьями глины черной слюистой, мягкопластичной, с включениями дресвы и гравия (до 20%)
f,lgIst-dns		ИГЭ-9	Дресвяно-щебнистый грунт, плотный, водонасыщенный, коричнево-серый, с заполнителем из песка разной крупности, реже с супесчано-суглинистым заполнителем
K,lg		ИГЭ-10	Песок пылеватый, прослоями мелкий, плотный, водонасыщенный, темно-серый с зеленоватым оттенком, ритмично чередующийся с прослоями мощностью 0.4–1.5 м суглинков легких песчанистых, преимущественно тугопластичных, местами с железистыми конкрециями, и супесей песчанистых, пластичных, реже твердых, с размытыми нечеткими границами перехода, с отдельными прослоями мощностью 0.05–0.4 м песчаника плотного, крепкого, на фосфатно-сидеритовом цементе
			Пьезометрический уровень напорных вод, его абсолютная отметка и дата замера
			Абсолютная отметка (числитель) уровня установления подземных вод и дата замера (знаменатель)
		Высота напора	
		Общегородской дренажный колодец	

Рис. 1. Окончание

ния грунтов восходящим потоком подземных вод. В чем же заключается эта уникальность? В естественных условиях такие явления встречаются нечасто и далеко не везде, но достаточно хорошо изучены в разных странах мира [13]. Их техногенные аналоги в основном характерны для объектов гидротехнического строительства [12]. Ни то, ни другое не имеет отношения к рассматриваемому объекту. Вместе с тем примыкающие к бетонным сооружениям грунты основания объектов промышленного и гражданского строительства тоже могут разрушаться потоком подземных вод и выноситься им на земную поверхность [7]. Это напрямую касается данного объекта, однако здесь суффозионное разрушение грунтов происходит не только в зонах их контакта с бе-

тонными конструктивными элементами жилого здания, а частицы грунта выносятся в искусственно созданное подземное пустотное пространство (дренаж).

Следует отметить, что строительство рассматриваемого сооружения было заморожено в 2011 г. при возведении надземной части до 15-го этажа. Работы по возобновлению строительства были начаты во второй половине 2021 г. с откачки из подземной части здания воды, уровень которой находился на отметке 170.0 м, т.е. на 0.35 м выше пола второго подземного этажа. В настоящее время уровень подземных вод в пределах контура здания поддерживается на отметках 162.7–161.7 м, хотя в водозаборном зумпфе он понижается до отметки 159.7 м.

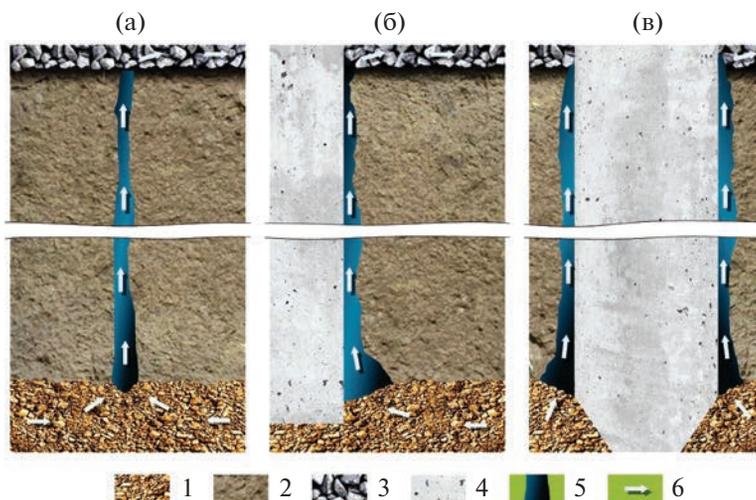


Рис. 2. Схемы, иллюстрирующие условия развития суффозионных процессов (фильтрационного разрушения и подземной эрозии) в основании строящегося здания при наличии: а – плохо затампонирующей разведочной скважины; б – неплотного примыкания грунта к “стене в грунте”, в местах ее погружения ниже подошвы водоупора; в – неплотного примыкания грунта к боковым поверхностям забивных свай. 1 – древесно-щебенистый грунт; 2 – суглинок (водоупор); 3 – материал пластового дренажа; 4 – бетон; 5 – сквозное нарушение сплошности водоупора, заполненное водой; 6 – направление потока подземных вод и транзита грунтовых частиц (в поровом пространстве пластового дренажа поток направлен в сторону водозаборного зумпфа).

Выполненные конструктивные особенности подземной части недостроенного сооружения (“стена в грунте”, единая система вертикального и пластового дренажей, свайно-плитный и плитный фундаменты и др.) основаны на выявленном изыскателями геологическом строении грунтовой толщи участка и гидрогеологических параметрах первого от поверхности водоносного горизонта подземных вод. В частности, наличие под фундаментной плитой пластового дренажа свидетельствует о том, что поступление в котлован больших объемов воды из глубокого напорного водоносного горизонта началось сразу после начала производства земляных работ по открытию котлована. Первоначально проектом пластовый дренаж не предусматривался. Таким образом, можно утверждать, что при существующем геологическом строении толщи грунтов основания рассматриваемого объекта поступление напорных вод из второго от поверхности водоносного горизонта в котлован могло осуществляться:

- из недостаточно, а возможно вообще не затампонируемых геологических разведочных скважин (рис. 2а), расположенных в пределах площади здания;

- по контакту “стена в грунте” – грунт, в местах проникновения низа “стены в грунте” ниже подошвы водонепроницаемых моренных суглинков (рис. 2б);

- после сооружения свайных фундаментов бурозабивным методом, когда концы свай вошли в

толщу водовмещающих грунтов, вода дополнительно стала поступать в дренажную систему по образовавшимся приконтактным присвайным полостям (рис. 2в).

Динамика изменения во времени гидрологических условий на участке строительства на различных его этапах показана на схематических разрезах, приведенных на рис. 3.

Сформировавшийся в пределах участка гидрогеологический режим свидетельствует, что осуществляющаяся откачка воды из оборудованного зумпфа в пределах подземной части строящегося здания из пластового дренажа понижает уровень воды не первого от поверхности водоносного горизонта подземных вод, попадающих в пластовый дренаж через “стену в грунте”, а второго основного надюрского межпластового напорного водоносного горизонта. Очевидно, что при существующем геологическом строении грунтовой толщи поступление больших объемов напорных межпластовых вод в пластовый дренаж возможно только в результате нарушения сплошности толщи моренных суглинков, являющихся непосредственными грунтами основания и верхним водоупором межпластовых вод. Такие нарушения сплошности моренных суглинков, как показано на рис. 1, 3 и 4, могли произойти только в процессе производства строительных работ нулевого цикла (сооружения “стены в грунте”, свайного фундамента, некачественного тампонажа пробуренных ранее разведочных скважин).

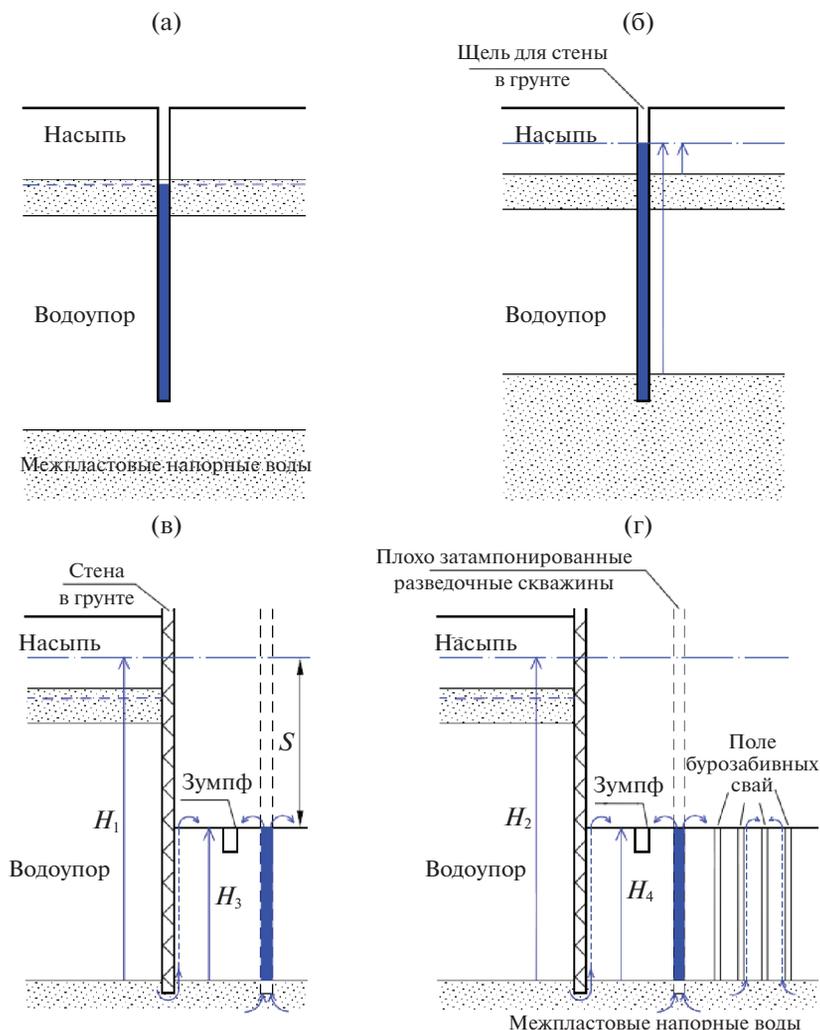


Рис. 3. Схематическое отражение изменения гидрогеологических условий на участке в процессе строительства подземной части объекта: а – не достиг подошвы водоупора; б – вскрывает кровлю напорного водоносного горизонта; в – в период разработки котлована; г – после сооружения свайного поля под высотными корпусами здания. H_1 и H_2 – высота напора подземных вод, за пределами “стены в грунте” при работающем насосе в зумпфе; H_3 и H_4 – высота напора подземных вод на момент включения и выключения насоса в зумпфе; S – величина водопонижения.

О поступлении напорных вод в пластовый дренаж свидетельствуют:

- значительный объем откачиваемой из дренажной системы воды – не менее 218 м^3 за 16 ч работы насоса производительностью $34 \text{ м}^3/\text{ч}$. Такое количество воды в три раза превышает возможный водоприток в котлован из первого от поверхности водоносного горизонта ($72.0 \text{ м}^3/\text{сут}$), даже если бы отсутствовала “стена в грунте”;

- более низкие значения абсолютных отметок пьезометрических уровней напорных вод в скважинах за пределами “стены в грунте” в настоящее время при постоянных откачках из дренажа, чем они были в 2004 г. при производстве первых изысканий на площадке. Так скважина № 6 имела отметку уровня 170.4 м (2004 г.), а в настоящее

время – 165.0 м (2022 г.); скважина № 6а соответственно 169.5 м (2004 г.) и 167.8 м (2022 г.). Как показано на рис. 1, в первом случае разность уровней составляет 5.4 м, а во втором – 1.7 м;

- значительная разница абсолютных отметок пьезометрических уровней воды (до 2.8 м) в скважинах, расположенных за пределами “стены в грунте”, в то время как в 2004 г. она не превышала 0.5 м. При этом в настоящее время минимальные значения высоты напора отмечаются в скважинах вне контура здания, которые расположены вблизи зумпфа.

Таким образом, сформировавшиеся в процессе строительства инженерно-геологические условия, обусловленные конструктивными особенностями подземной части сооружения и систематическим

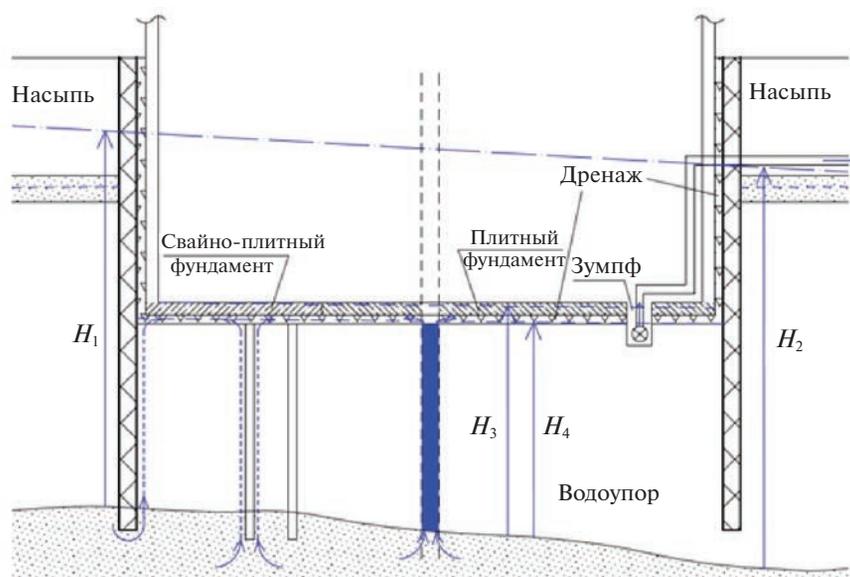


Рис. 4. Существующие гидрогеологические условия на участке строительства после сооружения пластового дренажа, фундаментной плиты и зумпфа, откачивающего воду из дренажной системы. H_1 и H_2 – высота напора подземных вод, за пределами “стены в грунте” при работающем насосе в зумпфе; H_3 и H_4 – высота напора подземных вод на момент включения и выключения насоса в зумпфе.

водопонижением в пределах контура здания, вызваны в первую очередь нарушением сплошности толщи верхнего водоупора межпластовых напорных вод и указывают на безусловное развитие здесь вертикальной суффозии водовмещающих неоднородных песчаных и дресвяно-щебнистых грунтов основания.

Однако процесс вертикальной суффозии протекает не только в несвязных грунтах основания, но, как было выявлено в процессе проведения инженерно-геологических изысканий, еще и в моренных суглинках, являющихся верхним водоупором напорных вод, и вызван он интенсивным размыванием вертикальных стенок скважностей¹, сформировавшихся в местах достижения подземными конструкциями кровли водоносного горизонта [4, 5, 7, 8]. Согласно определению В.П. Хоменко [9], такой тип суффозии можно отнести к восходящей суффозии “вулканического” характера или к “псевдовулканической суффозии”.

Размывание стенок скважностей вертикальным водным потоком

Процесс интенсивного размывания стенок скважностей, образовавшихся в верхней водоупор-

¹ Под скважностью здесь авторами понимается объем всех макропустот в связном грунте, обусловленный их трещиноватостью или различными видами пустотности (полостей), сформировавшихся в грунтовой толще в процессе изыскательских или строительных работ (плохой тампонаж или его отсутствие в буровых скважинах, присвайные трещины и пустоты вокруг бурозабивных свай и др.).

ной толще моренных суглинков был установлен при производстве буровых и зондировочных работ, осуществляемых с поверхности фундаментной плиты (рис. 5). В ряде намеченных скважин (в трех из шести) испытание грунтов статическим зондированием было проведено до производства буровых работ. Во всех трех точках при достижении кровли гравийно-галечниковых грунтов на глубинах 9.5–12.0 м от условного нуля был получен отказ в проникновении зонда диаметром 38 мм при нагрузке 10 т. Через три дня в местах проведения испытаний глинистых грунтов методом статического зондирования было осуществлено бурение скважин диаметром 108 мм. И во всех этих скважинах до глубин 9.5–12.0 м имел место провал бурового снаряда, что свидетельствовало о расширении полостей диаметром 38 мм до размеров, превышающих 108 мм.

Были предприняты попытки натурного измерения размеров размывостей с использованием видеокамеры с горизонтальной масштабной линейкой в двух скважинах (вода в третьей скважине из-за малого срока (1.5 сут), прошедшего после бурения, оказалась сильно замутненной с нулевой видимостью). Поперечные размеры скважностей измерялись каверномером на глубинах 3.0; 4.0 и 8.5 м, от поверхности фундаментной плиты. Кроме того, по окончании замеров осуществлялась непрерывная засыпка вертикальных скважностей песчаным грунтом средней крупности до полного их заполнения. Фиксировался объем засыпанного песка в скважину. Зная мощность моренных суглинков (от подошвы водоупора до по-



Рис. 5. Формирующийся конус выноса из пылеватых и глинистых частиц вокруг скважины, расположенной на поверхности фундаментной плиты, псевдо-вулканической суффозией на исследуемом объекте.

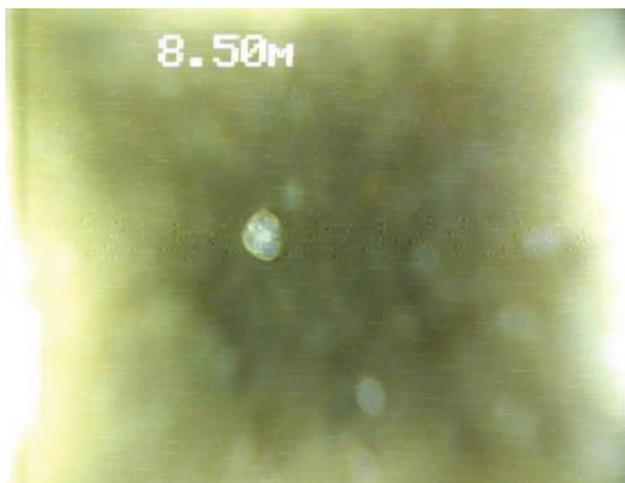


Рис. 6. Плавающая гравийная частица в открытой скважине на высоте 1.3 м выше кровли напорного водоносного горизонта.

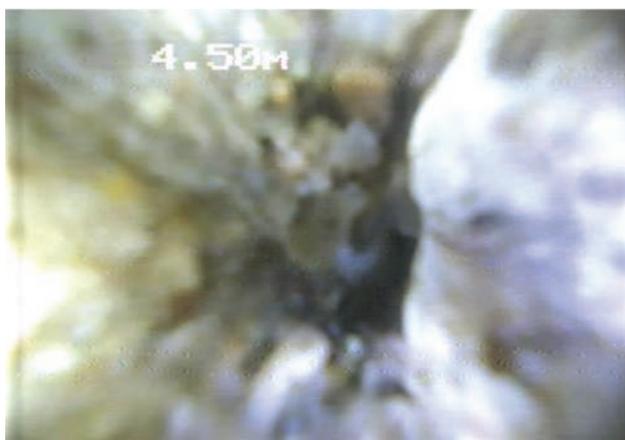


Рис. 7. Щебнистая пробка в открытой скважине в месте вывала крупной щебенки (валуна).

дошвы пластового дренажа) в каждой скважине по данным статического зондирования и объем песчаного заполнителя, рассчитывался средний диаметр скважины на момент ее засыпки.

Измерения каверномером показали, что через 5 сут после зондирования диаметр скважностей на глубине 3.0 м (на 1.5 м ниже проектной отметки дна котлована) составил ≈ 140 мм, а на глубине 8.5 м – не менее 310 мм. Следует отметить, что форма скважностей в сечении довольно изометричная (рис. 6, 7). Результаты замеров позволили оценить интенсивность размыва суглинистых стенок сквозных вертикальных полостей, которая на глубинах 3.0 и 8.5 м составила за 5 сут от 0.042 до 0.11 см/ч соответственно.

О вертикальной скорости потока воды в одной из скважностей диаметром около 310 мм на глубине 8.5 м можно судить по фотоснимку, приведенному на рис. 6, когда гравийная частица размером в поперечнике около 1 см находится во взвешенном состоянии (плавает) на высоте 1.3 м выше подошвы моренных суглинков. Основываясь на законах гидродинамики и используя уравнение Бернулли, можно рассчитать, что скорость потока здесь составляет 2.0 м/с, при этом гидродинамический напор достигает величины 1.2 кг/см².

Таким образом, размывание суглинистых стенок сквозных вертикальных скважностей, образовавшихся в процессе строительства подземных конструкций и после зондирования в толще водонепроницаемых моренных суглинков, может быть дополнительным фактором суффозионного привноса дисперсных (песчаных, пылеватых и глинистых) частиц в толщу пластового дренажа, что неминуемо приведет к очень скорой его кольматации. С другой стороны, развитие таких процессов ведет к формированию большого количества пустот в глинистой толще, к разуплотнению грунтов основания и значительному снижению их несущей способности, особенно при свайно-плитном фундаменте, а в отдельных случаях даже может привести к провальным явлениям под фундаментной плитой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие подземных вод непосредственно под плитными фундаментами глубокого заложения (плитой) внутри “стены в грунте”, приводящее к нарушению проектных отметок и всплытию сооружения, связано исключительно с геологическим строением и инженерно-геологическими условиями территории строительства. Наиболее типичными являются условия, когда подземные (грунтовые или межпластовые напорные) воды находятся в сжимаемой толще грунтов основания, а их уровни, включая пьезометрический, находятся вблизи поверхности земли.

Глубокое заложение фундаментов в сочетании с систематическим водопонижением внутри “стены в грунте” и конструктивными особенностями фундаментов и сопутствующих им дренажных систем способствуют развитию суффозионного процесса в водовмещающих несвязных грунтах как внутри “стены в грунте”, так и снаружи.

В рассмотренном авторами случае, при нарушении сплошности водонепроницаемой толщи и возникновении вертикальных потоков напорных вод, имеет место не только интенсивное развитие восходящей суффозии “вулканического” характера (“псевдовулканической суффозии”) в водовмещающих несвязных грунтах, которая приводит к их разуплотнению и снижению их несущей способности, но и образование крупных полостей в толще глинистых грунтов основания за счет размывания стенок скважностей, возникших в процессе строительства фундаментов или производства инженерно-геологических изысканий, способных привести к провальным явлениям в грунтах непосредственного основания сооружения.

В подобных случаях процесс размывания стенок скважностей в глинистых грунтах осуществляется не только за счет высоких скоростей (силы) восходящего водного потока, но и за счет шлифования и истирания (корразии) стенок твердыми песчаными частицами, переносимыми потоком.

Возникновение на объекте установленных в процессе изысканий инженерно-геологических условий свидетельствует о профессиональной безграмотности конструкторов и проектировщиков (полном отсутствии знаний основ дисциплины “инженерная геология”), допустивших в проектных решениях в несложных (согласно СП47.13330.2016, приложение Г) гидрогеологических условиях возможность вскрытия строительными конструкциями кровли водоносного горизонта при строительстве подземной части сооружения.

При производстве инженерно-геологических изысканий в сходных с описанными выше условиями особое внимание изыскатели должны обращать на гидрогеологические особенности участка. Основные гидрогеологические параметры встреченных водоносных горизонтов и вмещающих их грунтов следует определять только методом кустовых откачек.

Важнейшим условием производства инженерно-геологических изысканий при выявлении в грунтах основания высоконапорных межпластовых водоносных горизонтов должно являться обязательное тампонирование разведочных скважин высокомарочным бетонным раствором в интервале глубин залегания подошвы верхнего водоупора и, как минимум, проектной отметкой

дна котлована, сразу после окончания бурения скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.А.* Методика оценки карстово-суффозионной опасности и риска в Москве. М: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. 80 с.
2. *Анисимов В.В., Тер-Мартirosян З.Г.* Влияние механической суффозии на дополнительные осадки оснований фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. № 4. С. 4–8.
3. Инженерная геология России. Т. 2. Инженерная геодинамика территории России. / Под ред. В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина. М: Издательский дом “КДУ”, 2013. 816 с.
4. *Кашперюк П.И., Лаврусевич А.А., Никитина К.В., Крашенинников В.С.* Проектные решения в современном фундаментостроении: функция прогноза работы системы “основание-фундамент” // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 49–54.
5. *Кашперюк П.И., Никитина К.В.* К вопросу о карстово-суффозионных проявлениях в карстующихся толщах города Москвы // Опасные для строительства геологические процессы: матер. Междунар. семинара, посв. 70-летию д. г.-м.н., профессора В.П. Хоменко. 2019. С. 40–42.
6. *Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л.* К вопросу геологического районирования территории северо-запада Москвы по степени опасности развития карстово-суффозионных процессов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: матер. научно-практ. конференции. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 24–40.
7. *Лаврусевич И.А., Хоменко В.П., Лаврусевич А.А.* Недооценка суффозионной опасности при строительстве плоскостных бетонных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 11. С. 21–24.
8. Основные экзогенные процессы / [В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев и др.]. Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 271 с.
9. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
10. *Хоменко В.П.* Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: матер. междунар. симп. / Под ред. В.Н. Катаева и др. Пермь: ПГИУ, 2015. С. 50–60.
11. *Щербаков С.В.* Прогнозирование устойчивости сооружений в зависимости от суффозионности грунтов // Трофимуковские чтения. Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 2013. С. 584–586.
12. Erosion of Geomaterials. S. Bonelli (ed.). N.Y., ISTE/Wiley, 2012. 371 p.
13. *Kälin M.* Hydraulic piping – theoretical and experimental findings // Canadian Geotechnical Journal. 1977. V. 14. № 1. P. 107–124.

DEWATERING AS A LEADING FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF SUFFUSION UPON THE CONSTRUCTION OF DEEP FOUNDATIONS

P. I. Kashperyuk^{a,#}, D. S. Moskaley^{b,##}, and V. P. Khomenko^{a,###}

^a*Moscow State Civil Engineering University,
Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia*

^b*“Special survey for high-rise construction” Research and Production LLC,
ul. Akhitekтора Vlasova, 45A, Moscow, 117393 Russia*

[#]*E-mail: npf-sivs@yandex.ru*

^{##}*E-mail: cangaro@mail.ru*

^{###}*E-mail: khomenko_geol@mail.ru*

The article considers the main technogenic factors leading to the development of mechanical suffusion during the construction and operation of buildings and structures with deep foundations. At a specific object, the dynamics of the development of an ascending suffusion process of a “volcanic” nature (“pseudovolcanic suffusion”) caused by systematic water drawdown and discontinuity of the upper aquiclude during construction work was studied. It is proved that the need for constant pumping groundwater entering the drainage system results rather from the violation of the upper aquiclude continuity, serving the soil foundation upon the construction of “retaining wall” and pile foundation than from the engineering defects in the constructed impervious screen. The research results made it possible for the first time to evaluate the possibilities of using two methods for determining the development of the ascending suffusion process in time; the method of measuring the duty cycles with a caliper and the method of filling the duty cycles with medium-sized sand until the formed volume is completely filled. Based on the laws of hydrodynamics, an attempt was made to determine the speed of the upward flow and the magnitude of the hydrophysical head. It is noted that the most important condition for the production of engineering surveys, when identifying interstratal high-pressure aquifers in the soils of the base, should be the mandatory plugging of exploration wells with high-quality concrete mortar in the range of depths of the bottom of the upper aquiclude and, at least, the design mark of the bottom of the pit, immediately after the completion of drilling.

Keywords: *mechanical suffusion, pseudovolcanic suffusion, cohesive and non-cohesive soils, head gradient, filtration flow velocity, erosiveness of cohesive soils, water drawdown, vertical impervious screen*

REFERENCES

1. Anikeev, A.A. *Metodika otsenki karstovo-suffuzionnoi opasnosti i riska v Moskve* [Methodology for assessing karst-suffusion hazard and risk in Moscow]. Moscow, Lambert Academic Publishing, 2017, 80 p. (in Russian)
2. Anisimov, V.V., Ter-Martirosyan, Z.G. *Vliyanie mekhanicheskoi suffozii na dopolnitel'nye osadki osnovanii fundamentov* [Influence of mechanical suffusion on additional settlements of foundation foundations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2009, no. 4, p. 4–8. (in Russian)
3. *Inzhenernaya geologiya Rossii. T.2. Inzhenernaya geodinamika territorii Rossii* [Engineering geology of Russia. Vol. 2. Engineering geodynamics of the territory of Russia]. V.T. Trofimov, E.V. Kalinin, Eds. Moscow, “KDU” Publ. house. 2013, 816 p. (in Russian)
4. Kashperyuk, P.I., Lavrusevich, A.A., Nikitina, K.V., Krasheninnikov, V.S. *Proektnye resheniya v sovremenном fundamেন্টостроении: funktsiya prognoza raboty sistemy “osnovanie-fundament”* [Design solutions in modern foundation engineering – the function of forecasting the “soil-foundation” system operation]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 12, pp. 49–54. (in Russian)
5. Kashperyuk, P.I., Nikitina, K.V. *K voprosy o karstovo-suffuzionnykh proyavleniyakh v karstuyushchikh stratah g. Moskvy* [About karst-suffusion manifestations in the karstified strata of Moscow]. In: *Opasnye dlya stroitel'stva geologicheskie protsessy. Mater. mezhd. seminar, posv. 70-letiyu prof. V.P. Khomenko* [Hazardous for construction geological processes: Proc. Intern. Workshop devoted to 70th anniversary of Prof. V.P. Khomenko]. 2019, pp. 40–42. (in Russian)
6. Kochev, A.D., Chertkov, L.G., Zayonts, I.L. *K voprosy geologicheskogo raionirovaniya territorii severo-zapada Moskvy po stepeni opasnosti razvitiya karstovo-suffuzionnykh protsessov* [About geological zoning of the territory in the north-west of Moscow according to the hazard of karst-suffusion development]. Proc. Sci.-Pract. Conference “Present-day engineering-geological problems and methods of their solution”. Moscow, Geomarket-ing Publ., 2017, pp. 24–40. (in Russian)
7. Lavrusevich, I.A., Khomenko, V.P., Lavrusevich, A.A. *Nedootsenka suffuzionnoi opasnosti pri stroitel'stve plo-skostnykh betonnykh sooruzhenii* [Underestimating the suffusion hazard upon constructing planar concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 11, pp. 21–24. (in Russian)

8. *Opasnye ekzogennye protsessy* [Hazardous exogenous processes]. V.I. Osipov, V.M. Kutepov, V.P. Zverev, et al. Moscow, GEOS Publ., 1999, 271 p. (in Russian)
9. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
10. Khomenko, V.P. *Karstovoe provalooobrazovanie: mekhanizm i otsenka opasnosti* [Karst sinkhole formation: mechanism and risk assessment]. Proc. Intern. Symposium "Environmental safety and construction in karst areas". Kataev V.N. et al., Eds., Perm, PGU Publ., 2015, p. 50–60. (in Russian)
11. Shcherbakov, S.V. *Prognozirovanie ustoichivosti sooruzhenii v zavisimosti ot suffuzionnosti gruntov* [Forecasting the stability of structures depending on soil suffusion]. Trofimuk Readings, Novosibirsk, Institute of Petroleum Geology and Geophysics SO RAN, 2013, pp. 584–586. (in Russian)
12. Erosion of geomaterials. S. Bonelli, Ed., New York, ISTE/Wiley Publ., 2012, 371 p.
13. Kälin, M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, vol. 14, no 1, pp. 107–124.