

Определение коэффициента фильтрации стабилизированного грунта

УДК 69.058

Иванов Андрей Юрьевич

магистрант, Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), (Москва, Россия); e-mail: mr.andre.ivanov@yandex.ru

Дегаев Евгений Николаевич

к.т.н., доцент кафедры Жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), (Москва, Россия); e-mail: degaev@inbox.ru

Краев Борис Сергеевич

главный инженер, ООО «Научно Технический Центр Строительные Технологии» (ООО «НТЦСТ», г. Ивантеевка); e-mail: bkraev@yandex.ru

Барabanова Татьяна Алексеевна

к.т.н., доцент кафедры Жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), (Москва, Россия); e-mail: BarabanovaTA@mgsu.ru

Аннотация: Основная задача стабилизации грунтов — это изменение их физических характеристик с целью укрепления. Среди основных характеристик стабилизированного грунта отсутствуют требования к его фильтрации. Между тем коэффициент фильтрации является важным параметром, характеризующим проницаемость грунтов в отношении фильтрации воды при полном насыщении, численно равный скорости фильтрации при единичном градиенте напора. В статье представлены результаты испытания по определению коэффициента фильтрации стабилизированного грунта стандартными методами определения коэф-

фициента фильтрации глинистого грунта. Данное исследование показывает свою эффективность и дает возможность в дальнейшем проводить испытания стабилизированных грунтов различного состава.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации, стабилизированный грунт, испытание грунта, нефтешламы, особенности стабилизированного грунта.

Актуальность работы

Согласно ПНСТ 322-2019 [1] стабилизированным считается грунт, полученный путем смешивания

DETERMINATION OF THE FILTRATION COEFFICIENT OF STABILIZED SOIL

Ivanov Andrey Yuryevich

master's student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (Moscow, Russia); e-mail: mr.andre.ivanov@yandex.ru

Degaev Evgeniy Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (Moscow, Russia); e-mail: degaev@inbox.ru

Kraev Boris Sergeevich

Chief Engineer, LLC «Scientific and Technical Center of Construction Technologies» (LLC «STCST», Ivanteevka); e-mail: bkraev@yandex.ru

Barabanova Tatiana Alekseevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Department of Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (Moscow, Russia); e-mail: BarabanovaTA@mgsu.ru

Abstract: The main task of soil stabilization is to change their physical characteristics in order to strengthen them. Among the main characteristics of stabilized soil, there are no requirements for its filtration. Meanwhile, the filtration coefficient is an important parameter characterizing the permeability of soils in relation to water filtration at full saturation, numerically equal to the filtration rate at a unit pressure gradient. The article presents the results of a test to determine the filtration coefficient of stabilized soil using standard methods for determining the filtration coefficient of clay soil. This study shows its effectiveness and makes it possible to further test stabilized soils of various compositions.

Keywords: filtration coefficient, stabilized soil, soil testing, oil sludge, features of stabilized soil

грунтов со стабилизаторами (или же стабилизаторами совместно с вяжущим веществом в количестве до 2% от массы необработанного грунта) механизированным способом с помощью ресайклеров, или же в смесительных установках, и с последующим их уплотнением при оптимальной влажности.

Основная задача стабилизации грунтов – это изменение их физических характеристик с целью укрепления. При стабилизации грунтов, как правило, применяются вяжущие материалы, основой которых является цемент, гашеная известь, золы уноса. Используют также вяжущие вещества имеющие статус отхода производства. В основном укреплению подлежат грунты, используемые в дорожном строительстве при устройстве оснований или откосов. В соответствии с ОДМ 218.4.1.001-2020 [2] для устройства насыпей ниже границы рабочего слоя, грунты подверженные к набуханию, без проведения мероприятий по улучшению их свойств, применять не допускается. Причиной является изменчивость их физико-механических свойств под воздействием погодно-климатических факторов (циклов увлажнения-высушивания, промерзания-оттаивания).

Мероприятия по улучшению физико-механических свойств грунтов для их применения в конструкциях земляного полотна автомобильных дорог должны обеспечить получение нового композиционного материала с заданными физико-механическими свойствами на расчетный период строительства и эксплуатации автомобильной дороги.

В соответствии с ОДМ 218.4.1.001-2020 при подборе составов смесей рекомендуется обеспечить физико-механические показатели свойств укрепленных

тяжелых глин в проектном возрасте (28 суток), указанных в таблице 1 [2].

Среди перечисленных характеристик [1,3-7] отсутствуют требования к фильтрации стабилизированного грунта. Между тем коэффициент фильтрации является важным параметром, характеризующим проницаемость грунтов в отношении фильтрации воды при полном насыщении, численно равный скорости фильтрации при единичном градиенте напора [8]. Объясняется это тем, что основание не является дренажным слоем, через которое вода должна уходить из конструкции. В дорожном строительстве в качестве дренирующего слоя используют песчаные грунты с коэффициентом фильтрации свыше 1 метра в сутки.

Значения коэффициента фильтрации необходимы, если рассматривать применение стабилизированных грунтов в основаниях различных очистных сооружений или отстойников, для которых обязательным требованием является герметичное водонепроницаемое основание.

Целью работы является исследование возможности определения коэффициента фильтрации стабилизированного грунта стандартными методами.

Формулировка задачи

Применение стабилизированного грунта не ограничивается дорожным строительством. Применение стабилизированного грунта возможно также в нефтегазодобывающей отрасли в качестве основания для отстойников нефтешлама.

Нефтешламы образуются путем переработки нефти, и представляют из себя сложную физико-хими-

Таблица 1

Наименование показателя	Значение показателя для укрепленной тяжелой глины
Предел прочности на сжатие водонасыщенных образцов, кПа	не менее 100
Удельное сцепление водонасыщенных образцов, кПа	не менее 50
Угол внутреннего трения водонасыщенных образцов, град	не менее 15
Сопrotивление одноплоскостному срезу водонасыщенных образцов при нормальной нагрузке 15 кПа, кПа	не менее 50
Модуль упругости водонасыщенных образцов, МПа	не менее 40
Относительная деформация набухания без нагрузки, д.е.	менее 0,04
Коэффициент морозостойкости (отношение предела прочности при сжатии после замораживания-оттаивания к пределу прочности при сжатии водонасыщенных образцов)	не менее 0,65
Влажность образца после испытания на замораживание-оттаивание, %	не более 4 сверх оптимальной влажности
Степень пучинистости, %	1,0 и менее

ческую смесь. Состоят из нефтепродуктов, воды и различных примесей веществ такие как, глины, пески, ил и т.д. Эти отходы пагубно влияют на окружающую среду, в частности ухудшают плодородность почвы.

В этом случае основным показателем, определяющим возможность использования стабилизированного грунта, выступает такой показатель как коэффициент фильтрации, от которого будет зависеть «здоровье» почвы.

Результаты исследования

Определение коэффициента фильтрации стабилизированного грунта производили в соответствии с ГОСТ 25584-2016 на компрессионно-фильтрационном приборе (рис. 1) [9].

Для создания образцов (рис. 2) стабилизированного грунта в лабораторных условиях использовались [10, 11, 12]:

Грунт – буровой шлам, образующийся в процессе строительства скважин и представляющий со-

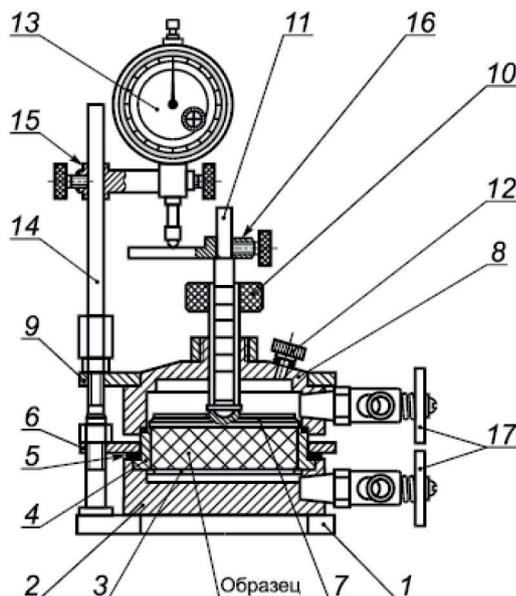


Рис. 1. Схема компрессионно-фильтрационного прибора для определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов [9]

1 - основание; 2 - поддон; 3 - нижний фильтр; 4 - рабочее кольцо; 5 - прокладка; 6 - нижнее прижимное кольцо; 7 - верхний фильтр; 8 - крышка; 9 - верхнее прижимное кольцо; 10 - арретир; 11 - шток; 12 - пробка; 13 - индикатор; 14 - стойка; 15 - держатель; 16 - упор; 17 - краны



Рис. 2. Лабораторные образцы стабилизированного грунта

бой вязкопластичную массу, содержащую выбуренную породу;

- Вода;
- Цементные вяжущие;
- Гипсовые вяжущие;
- Хлористый кальций.

Перед началом проведения испытаний по определению коэффициента фильтрации стабилизированного грунта, согласно ГОСТ 25584-2016, необходимо определить исходные физические параметры грунта, а именно: массу, влажность, плотность грунта, плотность частиц грунта, плотность сухого грунта [9].

Плотность грунта определяли в соответствии с ГОСТ 22733-2016. Рабочее кольцо взвешивали и заполняли грунтом следующим образом: кольцо ставили заостренным краем на выровненную поверхность грунта, затем по внешней стороне кольца излишки грунта срезали ножом, при этом кольцо вдавливали в образец грунта, заполняя его. Нижнюю часть образца грунта зачищали лабораторным ножом вровень с краями кольца и снова взвешивали вместе с рабочим кольцом [13].

Плотность грунта ρ , г/см³, определяли по формуле:

$$\rho = \frac{m_i - m_c}{V} \quad (1)$$

Ниже представлены результаты испытаний подготовленного лабораторного образца стабилизированного грунта:

$$\rho_{\text{до исп.}} = \frac{296,39 - 179,24}{40,02 \cdot 2,04} = 1,43 \text{ г/см}^3$$

m_i – масса формы с уплотненным грунтом, г;
 m_c – масса формы без грунта, г;



Рис. 3. Процесс проведения испытания на определение плотности грунта пикнометрическим методом

V – объем формы, см³.

Плотность сухого грунта d , г/см³ определяли по формуле:

$$w = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m} \quad (2)$$

$$w_{\text{до исп.}} = 100 \cdot \frac{58,61 - 44,92}{44,92 - 28,8} = 85 \%$$

i – плотность грунта, г/см³;

w_i – влажность грунта, % [13].

Влажность и плотность частиц грунта определяли в соответствии с ГОСТ 5180-2015. Отобранный образец грунта массой 15-50 г, поместили в бюкс, плотно закрыли крышкой и разместили в сушильном шкафу. Грунт высушивали в течение 5 часов при температуре 105 °С согласно методике. На всех этапах испытания грунт взвешивали и определяли влажность по формуле [6]:

$$\rho_d = \frac{\rho_i}{1 + 0,01w_i} \quad (3)$$

$$\rho_{d \text{ до исп.}} = \frac{1,43}{1 + 0,01 \cdot 85} = 0,78 \text{ г/см}^3$$

m – масса пустого бюкса, г;

m_0 – масса сухого грунта с бюксом, г;

m_1 – масса влажного грунта с бюксом, г [6].

Плотность частиц грунта определяли пикнометрическим методом следующим образом: 100 г образца грунта в сухом состоянии измельчали в фарфоровой ступке и просеивали сквозь сито с сеткой 2 мм. Остаток снова измельчали и просеивали. И так пока весь образец не стал однородным. Из полученной взвеси для испытания взяли 10 г грунта [6].

Далее пикнометр на треть наполнили водой и взвесили. Добавили навеску грунта и снова взвесили. Пикнометр с содержимым сначала взболтали, а после кипятили 1 час. После пикнометр охладили до комнатной температуры, долили воды до мерной риски на горлышке и взвесили.

Плотность частиц грунта s , г/см³ вычисляли по формуле [6]:

$$\rho_s = \rho_w \cdot m_0 / (m_0 + m_2 - m_1) \quad (4)$$

$$\rho_s = (1 \cdot 10) / (10 + 77,5 - 82,55) = 2,02 \text{ г/см}^3$$

m_0 – масса сухого грунта, г;

m_1 – масса пикнометра с водой и грунтом после кипячения при температуре испытания, г;

m_2 – масса пикнометра с водой после кипячения при температуре испытания, г;

w – плотность воды после кипячения при температуре испытания, г/см³ [6];

Проведение испытаний по определению плотности частиц пикнометрическим методом выявила некоторую особенность лабораторного грунта, который образовывал пробку, которая препятствовала выливаю жидкости из пикнометра (рис. 3).

Подготовка к испытаниям предполагала, что вода и образцы грунта для проведения испытаний выдерживались в лаборатории до выравнивания их температуры с комнатной [9].

Согласно п. 4 ГОСТ 25584-2016 на нижнюю и верхнюю поверхности грунта положили фильтровальную бумагу, смоченную водой и вырезанную по внутреннему диаметру кольца. Установили кольцо с образцом грунта на нижний фильтр прибора. На рабочее кольцо установили прокладку и нижнее при-



Рис. 4. Образование кристаллов хлористого кальция в результате длительного водонасыщения лабораторного образца

жимное кольцо. После на приборе затянули нижние гайки. Затем установили верхний фильтр на образец грунта. Поставили на место крышку и установили на нее верхнее прижимное кольцо и затянули верхние гайки [9].

Соединили пьезометр с одним из кранов в соответствии с направлением фильтрации, выбранным для проведения испытания. Все три крана прибора оставляли закрытыми. Резиновым шлангом соединили свободный кран поддона с сосудом, наполненный водой, который установили выше пьезометров. После полной сборки установки, вывернули пробку воздушного клапана на 1-2 оборота и открыли кран прибора, соединенный с сосудом с водой. Водонасыщение образца проводили до полного водонасыщения грунта [9]. Водонасыщение лабораторного грунта осуществлялось в течение 5 суток, в результате которого образовались кристаллы хлористого кальция (рис. 4).

По завершении насыщения образца закрыли нижний кран, через который вода поступала из сосуда в прибор, и залили образец грунта водой до верха крышки через верхний кран. После появления воды из-под пробки воздушного клапана пробку завернули. Порядок проведения испытаний соответствовал п. 4 ГОСТ 25584-2016. Воду наливали в пьезометр и устанавливали начальный напор, соответствующий заданному градиенту напора. Рядом с прибором установили дополнительный пьезометр с заглушенным нижним концом и заполнили его водой для учета количества испарившейся воды в процессе проведения испытания [9].

После этого открыли кран, соединяющий пьезометр с прибором, одновременно с краном слива воды из прибора и зафиксировали время начала фильтра-

ции воды. В процессе проведения испытания следили за значениями снижения уровня воды в обоих пьезометрах и фиксировали время. Отсчеты изменения уровня воды по пьезометрам проводили в зависимости от скорости фильтрации. В совокупности получилось 6 измерений [9].

После проведения испытания, образец грунта с кольцом взвесили и определили его плотность и влажность:

$$\rho_{\text{после исп.}} = \frac{296,75 - 179,24}{40,02 \cdot 2,04} = 1,44 \text{ г/см}^3$$

$$\rho_d \text{ после исп.} = \frac{1,44}{1 + 0,01 \cdot 90} = 0,76 \text{ г/см}^3$$

Результаты зафиксировали в журнале лабораторного определения коэффициента фильтрации. Физические характеристики образца стабилизированного грунта приведены в таблице 2.

По результатам испытания построили график в координатах $\ln(H_0/H_0-S)$ и Ct (рис. 5).

H_0 – начальная высота уровня воды в пьезометре, см;

S – снижение уровня воды в пьезометре, см;

t – время, при котором произошло снижение уровня воды на значение S , с.

При этом:

$$C = \frac{F_k}{F_n \cdot l_k} \quad (5)$$

F_k – площадь поперечного сечения образца грунта, см²;

F_n – площадь сечения фильтрационной трубки над образцом грунта, см²;

l_k – высота образца грунта, см.

Таблица 2

номер образца	Тип грунта	Слоение грунта	Влажность грунта, доли единицы		Масса, г			Плотность, г/см ³				
			до испытания	после испытания	кольца с грунтом		кольца грунта	грунта ρ		частиц грунта s	сухого грунта d	
					до испытания	после испытания		до испытания	после испытания сухого		до испытания	после испытания
1	Инертный наполнитель (шлам)	ненарушенное	0,85	0,90	296,39	296,75	179,24	1,43	1,44	2,02	0,78	0,76

Таблица 3

Время от начала опыта t , с	Снижение см	Снижение уровня в дополнительном пьезометре за счет испарения S_2 , см	Истинное снижение уровня воды за счет фильтрации S , см	Температура воды T_f , °C	Ct , с/см	$\ln(H_0/H_0-S)$
12	4,0	0	4,0	20,7	1874,3	0,146
27	7,5	0	7,5	20,7	4217,1	0,293
39	9,6	0	9,6	20,7	6091,3	0,394
51	11,4	0	11,4	20,7	7965,6	0,488
70	13,5	0	13,5	20,7	10933,1	0,612
80	14,5	0	14,5	20,7	12495,0	0,676

Результаты определения коэффициента фильтрации образца стабилизированного грунта приведены в таблице 3.

По построенному графику провели диагностику полученных результатов. Точки на графике лежат на прямой линии, что является подтверждением требуемой точности проведения испытания. Стоит отметить, что методикой также предусмотрено, что в случае необходимости, можно проводить отбраковку недостоверных точек, которые сильно выбиваются. Оставшиеся точки должны соединяться прямой линией. Число точек для аппроксимации должно быть не менее трех, если их меньше, то испытание следует повторить [9].

Коэффициент фильтрации K , см/с, при температуре проведения испытания, равный угловому коэффициенту построенной прямой линии, определяли по формуле:

$$K = \Delta \ln(H_0/H_0-S) / \Delta Ct \quad (6)$$

$$K = 0,488 - 0,293 / 7965,6 - 4217,1 = 0,000052 \text{ см/с}$$

$\Delta \ln(H_0/H_0-S)$ и ΔCt – разница значений двух произвольных точек на построенной прямой линии.

Коэффициент фильтрации K_{10} , м/сут, приведенный к условиям фильтрации при температуре 10 °C, определяли по формуле:

$$K_{10} = 864 \frac{K}{T} \quad (7)$$

864 – коэффициент перевод из сантиметров в секунду в метры в сутки;

T – поправочный коэффициент для приведения значения коэффициента фильтрации к условиям фильтрации воды при температуре 10 °C, принимается равным 1 для температуры 10 °C [9].

Итоговое значение коэффициента фильтрации вычислили до второй значащей цифры:

$$K_{10} = 864 \cdot 0,000052 = 0,031 \text{ м/сут}$$

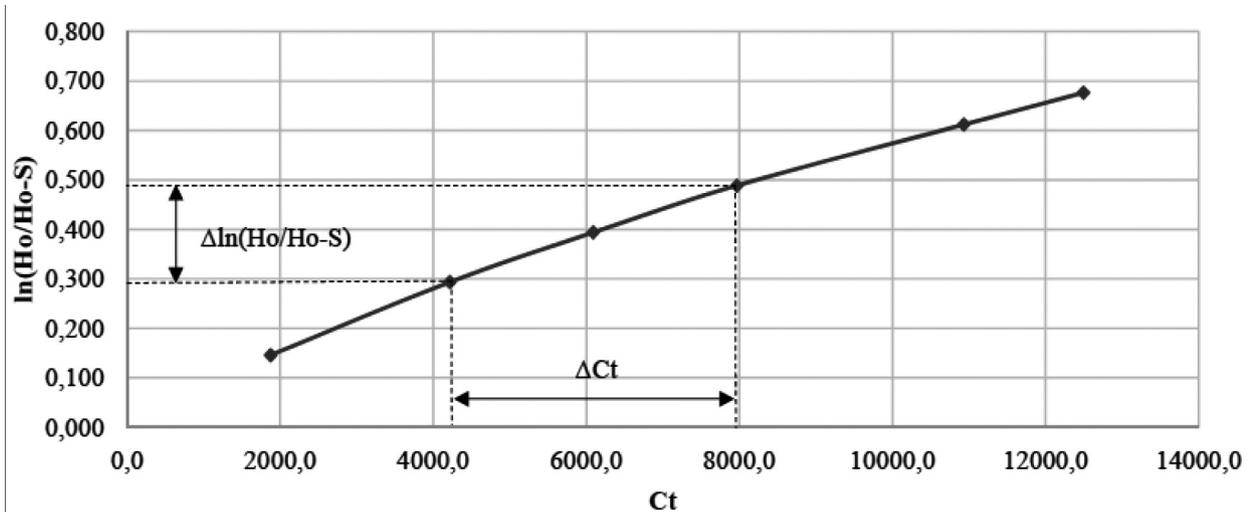


Рис. 5. График для определения коэффициента фильтрации образца стабилизированного грунта

Выводы

Отсутствие требований к определению коэффициента фильтрации стабилизированных грунтов для дорожного строительства объясняется в самом назначении этого грунта, который не применяется в качестве фильтрующего или водозадерживающего слоя.

Между тем, при применении стабилизированного грунта в качестве основания для отстойников нефтешлама, следует знать характеристики грунта к водопроницанию, отражающиеся в коэффициенте фильтрации.

Применение стандартных методик при определении коэффициента фильтрации для стабилизированного грунта выявило, особенности, характерные для таких грунтов, а именно:

- при применении добавок хлористого кальция, образуются кристаллы при длительном водонасыщении образца;
- при определении плотности частиц пикнометрическим способом образуется пробка, предотвращающая вытекание воды из пикнометра.

Возможно, этот механизм в совокупности с физико-механическими свойствами грунта и обеспечивает низкие значения коэффициента фильтрации.

Проведенные испытания на определение коэффициента фильтрации показали, что подобранный состав стабилизированного грунта в лабораторных условиях, относится к слабопроницаемым грунтам. В частности, при использовании такого состава при устройстве оснований для отстойников нефтешлама, дополнительно следует использовать гидроизоляционные материалы [14–18].

Литература

1. ПНСТ 322-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими».
2. ОДМ 218.4.1.001-2020 «Методические рекомендации по применению в конструкции земляного полотна автомобильных дорог тяжелых (жирных) глин, укрепленных вяжущими материалами».
3. ГОСТ 12248.1-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза».
4. ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости».
5. ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».
6. ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».
7. ГОСТ 28622-2012 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости».
8. ГОСТ 23278-2014 «Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости».
9. ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».
10. ТУ 2458-001-24975172-2011 «Инертный наполнитель для буровых шламовых амбаров».
11. Абрамова Т.Т. Использование стабилизаторов для улучшения свойств связных грунтов / Т.Т. Абрамова, А.И. Босов, К.Э. Валиева // Геотехника. – 2012. – №3. – С. 4–28.
12. Клековкина, М. П. Инновационные материалы — добав-

- ки и стабилизаторы для укрепления грунтов / М. П. Клековкина, К. В. Филиппова: Техника. Технологии. Инженерия. — 2017. — 34 с.
13. ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности».
 14. Дегаев Е.Н., Краев Б.С., Бобылев Д.Г. Особенности оценки сплошности свай методом сейсмоакустической дефектоскопии // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 1. Ст. 4. URL: <http://nsojournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.4.
 15. Degaev E., Rimshin V.I. checking the integrity of piles by seismoa cousticdefectos copy. Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019. 2020. С. 012153.
 16. Король Е.А., Никифорова Н.С. Особенности проектирования и строительства подземных сооружений неглубокого заложения в сложных грунтовых условиях. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 1. С. 25-27.
 17. Теличенко В.И., Король Е.А., Хлыстунов М.С., Завалишин С.И.
 18. Глобальные риски и новые угрозы безопасности ответственных строительных объектов мегаполиса. В книге: Городской строительный комплекс и проблемы жизнеобеспечения граждан. Сборник докладов научно-технической конференции. 2005. С. 211-218.