

Фильтрационная прочность грунта плотины в области
трубчатого водосброса круглой формы

Генрих Васильевич Орехов, Чан Мань Кыонг

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В мире происходит много разрушений грунтовых плотин из-за потери фильтрационной прочности грунтов тела плотины или основания. Фильтрационная устойчивость грунтов связана с явлением гидравлического разрыва (ГР), поэтому предотвращение условий, вызывающих ГР, является важной задачей при проектировании и эксплуатации грунтовых плотин. Гидравлический разрыв тесно связан также с неравномерной осадкой грунтов плотины и строительных конструкций. В грунтовых плотинах явление неравномерной осадки часто возникает в зонах между грунтом плотины и бортовыми массивами створа плотины, грунтом плотины и бетонными конструкциями, такими как водопропускные трубы и водосбросы, фундаментные элементы конструкций; водонепроницаемым ядром плотины и примыкающими к нему зонами грунта. Рассмотрена фильтрационная устойчивость грунтовых плотин в области трубчатых водосбросных сооружений.

Материалы и методы. Исследование проводилось с помощью численного моделирования с применением программного комплекса Plaxis. В качестве объекта исследования принята грунтовая плотина Бунг Бунг (Вьетнам).

Результаты. Результаты исследования показали, что нормальное напряжение вокруг водопропускной трубы было снижено до уровня намного ниже, чем давление воды в фильтрационном потоке с высокой вероятностью ГР в объеме грунта, находящегося под водосбросной трубой. В этих областях может произойти ГР. Предложены два конструктивных подхода к предотвращению ГР: изменить форму сечения водопропускной трубы, устроить глиняную рубашку вокруг водосбросной трубы. Оба подхода были проверены численным методом. Расчеты продемонстрировали, что применение обоих методов снижает условия возникновения ГР вблизи водопропускной трубы.

Выводы. Разрушение плотины из-за ГР может привести к серьезному повреждению. Внедрение методов предотвращения ГР важно для обеспечения безопасных условий работы плотины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фильтрация, грунтовая плотина, гидравлический разрыв, водопропускная труба, нормальное напряжение, неравномерная осадка, разрушение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орехов Г.В., Чан Мань Кыонг. Фильтрационная прочность грунта плотины в области трубчатого водосброса круглой формы // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 8. С. 1272–1282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1272-1282

Автор, ответственный за переписку: Чан Мань Кыонг, cuonghtcs@gmail.com.

Seepage strength of the dam soil in the area of a round-shaped
culvert spillway

Genrikh V. Orekhov, Tran Manh Cuong

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. There are many destructions of earth dams in the world due to the loss of seepage strength of soils of the dam body or foundation. The seepage stability of soils is directly related to the phenomenon of hydraulic fracturing (HF), so prevention of conditions causing hydraulic fracturing is a very important task in the design and operation of earth dams. Hydraulic fracturing is closely related to uneven settlement of the dam soils and building structures. In earth dams, the phenomenon of uneven settlement often occurs in the areas between the dam soil and the side masses of the dam site, the dam soil and concrete structures, such as culverts and spillways, foundation structural elements, the impervious core of the dam and adjacent soil zones. The article is devoted to the study of the seepage stability of soil dams in the area of round-shaped culvert spillway.

Materials and methods. The study was carried out with the help of numerical modelling using Plaxis software package. The Bung Bung earth dam (Vietnam) was taken as an object of study.

Results. The results of the studies showed that the normal stress around the culvert was reduced to a level much lower than the water pressure in the seepage flow with a high probability of hydraulic fracturing in the volume of soil below the spillway. Thus, hydraulic fracturing can occur in these areas. The article proposes two structural approaches to prevent hydraulic fracturing: to change the cross-sectional shape of the culvert and to install a clay jacket around the spillway.

Both approaches were tested numerically. The calculations demonstrated that the application of both methods reduces the conditions for the occurrence of hydraulic fracturing near the culvert.

Conclusions. Dam failure due to hydraulic fracturing can cause serious damage. The implementation of methods to prevent hydraulic fracturing is important to ensure the safe dam conditions.

KEYWORDS: seepage, earth dam, hydraulic fracturing, culvert, normal stress, uneven settlement, failure

FOR CITATION: Orekhov G.V., Tran Manh Cuong. Seepage strength of the dam soil in the area of a round-shaped culvert spillway. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1272-1282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1272-1282 (rus.).

Corresponding author: Tran Manh Cuong, cuonghtcs@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Плотины и водохранилища — это искусственные сооружения, построенные для эксплуатации и управления водными ресурсами [1]. Они имеют большое значение для социально-экономического развития, потому что не только предотвращают наводнения, но и обеспечивают воду для различных целей, таких как ирригация, питьевая вода, гидроэнергетика. Сегодня изменение климата серьезно угрожает безопасности плотин, сильно влияя на эксплуатацию и управление водными ресурсами, поэтому безопасность плотин и водохранилищ — актуальная задача [2–6].

В мире происходит много разрушений грунтовых плотин из-за потери фильтрационной прочности грунтов тела плотины или основания, что приводит к значительному материальному ущербу [7–11]. Считается, что гидравлический разрыв (ГР) является одной из основных причин сосредоточенной фильтрации во многих грунтовых плотинах. Причем замечено, что инциденты и аварии подобного рода возникают при первом заполнении водохранилища [8, 9, 12–14]. Гидравлический разрыв представляет собой процесс распространения и развития трещин в грунтах тела плотины под действием давления воды [15, 16]. Предыдущие исследования показали, что ГР тесно связан с возникновением неравномерной осадки в теле плотины [17]. Неравномерные осадки часто происходят на границе между различными материалами, например между водонепроницаемыми противофильтрационными ядрами и обочинами, водопропускными и водосбросными трубами и засыпкой грунта. Явления ГР могут возникать также между грунтовой засыпкой и элементами различных фундаментов [12, 18]. Под нагрузкой материалы с разными модулями упругости могут приводить к различным осадкам, что ведет к локальному понижению сжимающих напряжений в грунтах насыпных плотин.

В насыпных плотинах ГР может происходить через ядро плотины. Неравномерная осадка в ядре вызывает снижение напряжения до уровней намного ниже, чем давление воды [9, 15]. В такой ситуации фильтрационный поток способен проникнуть через существующие трещины в плотине и вызвать концентрацию напряжений в трещине. Поскольку прочность грунта на растяжение очень мала, трещины могут легко распространяться в областях грунта плотины, что может приводить к появлению сосредоточенной фильтрации, суффозионным процессам и, как

следствие, разрушению части плотины. Несколько инцидентов, связанных с ГР, произошло на плотинах Балдерхед (Англия), Стоктон (США), Вистер (США), Виддалсватн (Норвегия) и Тетон (США) во время первого заполнения водохранилища [13].

Описанный выше процесс потери грунтом плотины фильтрационной прочности наиболее часто происходит вокруг водосбросных или водопропускных систем трубчатого типа, где наблюдается неравномерная осадка и образование зон (в основном под трубой) с пониженными значениями сжимающих напряжений. Из-за неравномерной осадки нормальное напряжение в указанных зонах трубчатой конструкции может быть снижено до значений, которые намного ниже, чем давление воды. Согласно проведенным натурным наблюдениям исследователи пришли к выводу, что ГР служит наиболее вероятной причиной возникновения сосредоточенной фильтрации вдоль водопропускных трубчатых конструкций [17]. Во многих плотинах III и IV классов (высота плотины до 35 м) была обнаружена сосредоточенная фильтрация вдоль трубчатых водопропускных сооружений [19].

Цель исследования — установить механизм сосредоточенной фильтрации вдоль водопропускной трубы с точки зрения ГР.

В работах различных авторов часто выполнялся численный анализ с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для прогнозирования ГР насыпных плотин или фундаментов [20]. Расчетные результаты этих анализов затем сравнивались с результатами полевых или лабораторных испытаний. Нг и Смолл применяли МКЭ, чтобы объяснить причину инцидента на плотине Хиттеювет из-за гидравлического разрыва [11]. Нгамби и соавторы исследовали потенциальный риск ГР рядом с трубопроводами с помощью анализа конечных элементов (КЭ) в сочетании с наблюдениями на месте [17]. Кроме того, результаты моделей МКЭ использовались для сравнения с результатами лабораторных экспериментов при изучении реакции заглубленных труб на транспортные нагрузки [19]. Сравнение показало хорошее совпадение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Во Вьетнаме насчитывается около 7000 водохранилищ, образованных грунтовыми плотинами,

выполненными из песка или глинистых материалов. В основном это грунтовые низконапорные плотины IV класса гидротехнических сооружений (высотой до 15 м) и III класса (высотой от 15 до 25 или 35 м в зависимости от материала грунта). Водохранилища, образованные этими подпорными сооружениями, были построены давно и в настоящее время сильно деградировали, поэтому важно оценить безопасность водохранилищ.

Для проведения расчетов выбран гидроузел Бунг Бунг, имеющий небольшое водохранилище, расположенное в провинции Нгеан, центральный Вьетнам. Основные данные по гидроузлу приведены в табл. 1.

Табл. 1. Основные данные по гидроузлу Бунг Бунг

Table 1. Basic data of the Bung Bung hydrosystem

Площадь бассейна Reservoir area	0,85 км² / km²
Нормальный подпорный уровень Normal water level	35,00 м / m
Форсированный подпорный уровень Maximum water level	36,20 м / m
Уровень мертвого объема Dead water level	28,40 м / m
Отметка гребня плотины Dam crest mark	36,5 м / m
Максимальная высота плотины Maximum dam height	13,3 м / m
Плотина Dam	Грунтовая, однородная из суглинистого материала Soil, homogeneous from clay soil material
Длина плотины по гребню Dam lenght along the crest	123,6 м / m
Заложение верхового откоса Laying top slope	m = 3,00
Заложение низового откоса Laying down slope	m = 2,75
Эксплуатационный водосброс Spillway	Поверхностный, ширина водосливной грани 10 м Surface, spillway width 10 m
Система водоспуска Culvert	Железобетонная труба с внешним диаметром 1,2 м. Затвор со стороны нижнего бьефа Reinforced concrete pipe with an outer diameter of 1.2 m. Downstream side gate

В состав гидроузла Бунг Бунг входит однородная грунтовая плотина максимальной высотой около 21 м и длиной по гребню 123,6 м, поверхностный эксплуатационный водосброс и водоспускная труба, предназначенная для спуска воды из водохранилища в период ремонтных или реконструкционных работ. Водоспускная система проходит через все поперечное сечение плотины. На рис. 1, 2 показаны поперечное сечение *A-A* плотины и ее продольный разрез.

Водоспускная система приведена на рис. 3 в виде поперечного сечения по *B-B* на рис. 1. Она представляет собой железобетонную круглоцилиндрическую трубу, которая проходит поперек плотины на ее низких придонных отметках. Наружный диаметр трубы 1,2 м, внутренний 0,8 м. Труба уложена на бетонный фундамент толщиной 0,5 м.

Водоспускная система устроена у правого берега плотины, она выполнена из стальных труб диаметром 800 мм, толщиной 20 мм, покрытых железобетоном марки 300; ее длина равна 55,5 м. В конце трубы со стороны нижнего бьефа устроен затвор. Со стороны верхнего бьефа находится водоприемник.

Конструкция водосбросной трубы представлена на рис. 4, поперечное сечение *C-C* — на рис. 3.

Метод исследования

В данной работе использован программный комплекс Plaxis — программное обеспечение (ПО), основанное на принципе КЭ. Расчеты с помощью Plaxis выполнялись для оценки риска ГР вокруг водоспускной трубы.

Авторы статьи провели анализ напряжения в плоскости с применением МКЭ для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в плотине. Был использован простой критерий для прогнозирования потенциального риска ГР в любом месте тела плотины с помощью выходных результатов анализа путем сравнения нормального напряжения с давлением воды в этой точке. Такой анализ нарастания сжимающего напряжения позволяет лучше моделировать воздействия во время строительства, а результаты анализа могут показать распределение напряжения и смещения в плотине, особенно в местах, прилегающих к водоотводу. Кроме того, численный анализ также применялся для проверки эффективности контрмер, предложенных для снижения риска возникновения ГР в плотине.

Исследование изменения нарастания с помощью МКЭ выполнено для анализа деформации и напряжения в продольном сечении плотины, которое также включает поперечное сечение водопропускной трубы. В этом анализе тело плотины смоделировано с использованием 10 последовательных слоев насыпного грунта, каждый слой 130 см толщиной. На самом деле насыпная плотина состоит из большого количества слоев насыпного материала. Слои тщательно утрамбовываются до достижения определенной плотности. Тем не менее моделирование тела плотины со слишком большим количеством слоев

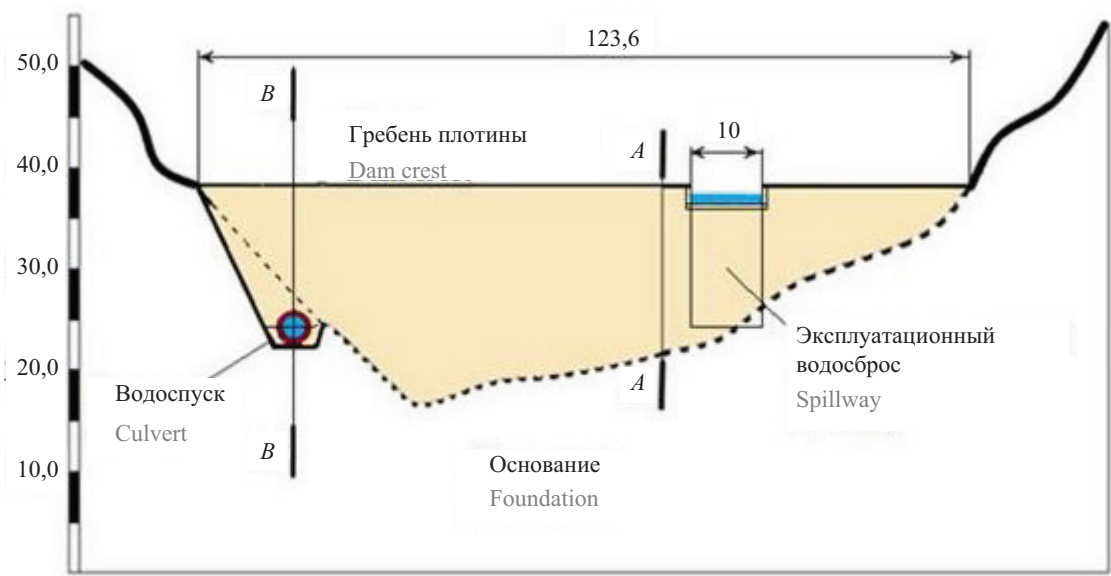


Рис. 1. Продольный разрез плотины. Размеры указаны в метрах

Fig. 1. Longitudinal section of the dam. Dimensions are given in meters

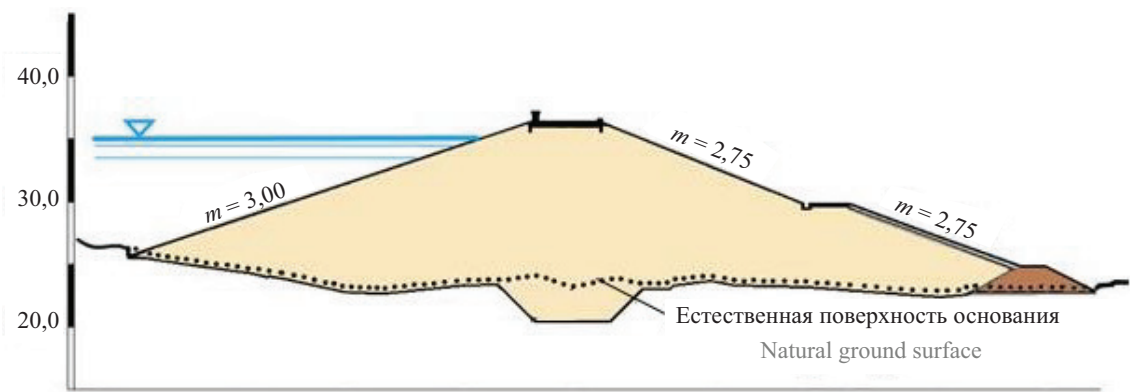


Рис. 2. Поперечный разрез однородной грунтовой плотины по сечению A-A на рис. 1. Высотные размеры даны в метрах

Fig. 2. Cross-sectional view of a homogeneous earth dam along the section A-A in Fig. 1. Height dimensions are given in meters

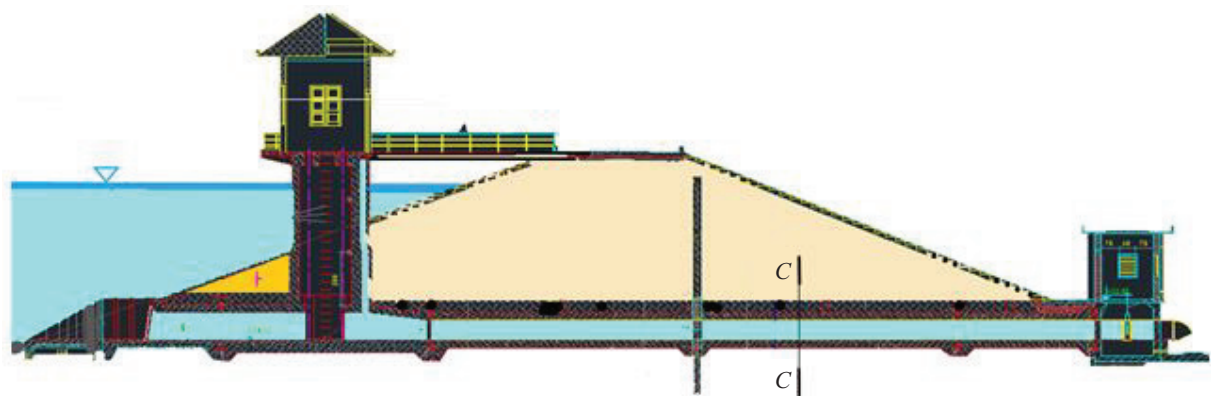


Рис. 3. Поперечный разрез плотины по водоспускному сооружению (сечение B-B на рис. 1)

Fig. 3. Cross section of the dam along the culvert (section B-B in Fig. 1)

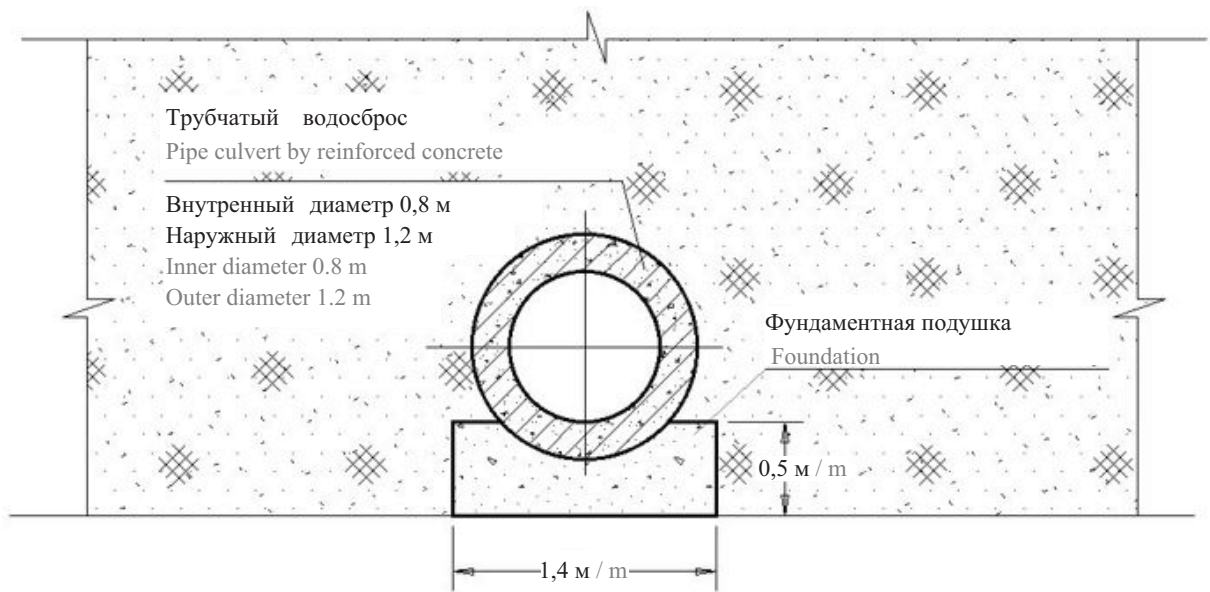


Рис. 4. Поперечное сечение водоспускной трубы по сечению C-C на рис. 3

Fig. 4. The cross section of the culvert pipe along the section C-C in Fig. 3

насыпного грунта может привести к тому, что модель будет громоздкой, а анализ может занять много времени из-за значительного количества элементов. Поэтому в этой статье количество слоев почвы было выбрано 10. Для моделирования НДС тела плотины, особенно прилегающего к водопропускной трубе, использовалась теория линейной упругости, которая может быть записана в общем виде, как:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где σ — сила, вызывающая деформацию; E — коэффициент пропорциональности, называемый модуль упругости; ε — величина деформации.

На рис. 5 изображена деформация сетки исследуемой области. Таким образом, для этой модели были необходимы только упругие свойства материалов конструкции, такие как общая плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Эти данные приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных расчетов получены зависимости, характеризующие НДС грунта плотины в области примыкания к трубе водоспуска. На рис. 6 приведено напряжение вокруг водопропускной трубы с использованием ПО Plaxis. График

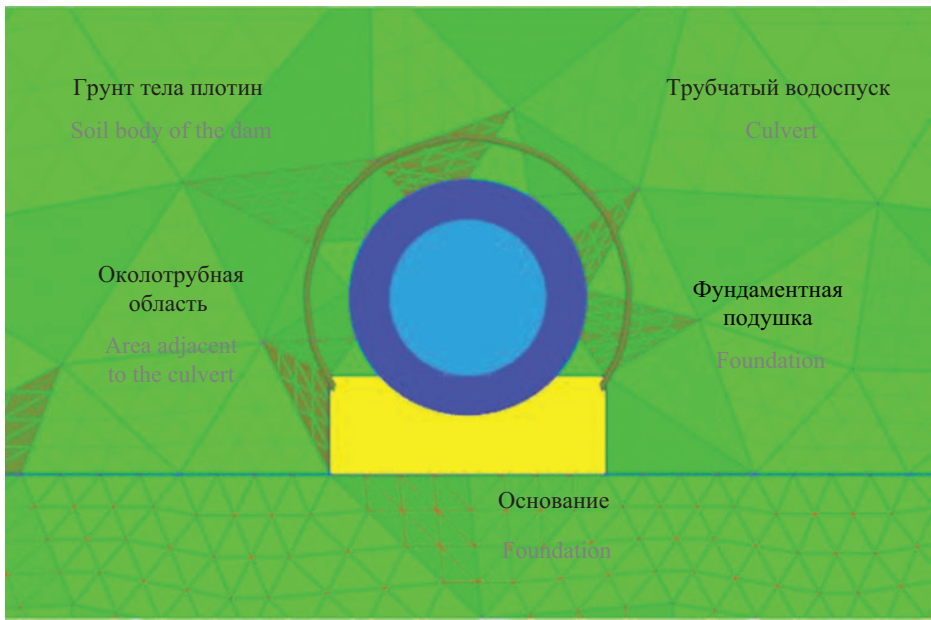


Рис. 5. Конечно-элементная дискретизация расчетной области

Fig. 5. Finite element discretization of the computational domain

Табл. 2. Физико-механические свойства материала
Table 2. Physical and mechanical properties of the material

Грунт плотины Dam soil	
Общая плотность грунта Total soil density	2000 кг/м³ kg/m³
Плотность сухого грунта Density of dry soil	1600 кг/м³ kg/m³
Угол внутреннего трения грунта Angle of internal friction of soil	31°
Коэффициент фильтрации Filtration coefficient	5,4 м/сут m/day
Модуль деформации Deformation modulus	20 · 10³ кН/м² kN/m²
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,3
Железобетон трубы водоспуска Reinforced concrete culvert	
Общая плотность Total density	2450 кг/м³ kg/m³
Модуль деформации Deformation modulus	24 · 10⁶ кН/м² kN/m²
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,2
Фундаментная подушка под трубу Foundation under pipe	
Общая плотность Total density	2400 кг/м³ kg/m³
Модуль деформации Deformation modulus	21 · 10⁶ кН/м² kN/m²
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,2
Основание Foundation	
Модуль деформации Deformation modulus	10⁶ кН/м² kN/m²
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	0,25

на рис. 7 показывает взаимосвязь между нормальным напряжением и нормальным напряжением за вычетом давления воды вокруг трубы в зависимости от угла θ . Нулевое значение угла θ соответствует нижней точке D на схеме (рис. 8). Отсчет угла θ принят по часовой стрелке. График показывает напряжение с обеих сторон водоспускной трубы намного ниже, чем сжимающие напряжения на верхней части трубы. Такое распределение напряжений около трубной области возникает из-за неравномерной плотности слоев грунта. Очевидно, что грунт над трубой сжат более сильно, чем грунт под трубой, поскольку он сжат верхними слоями тела плотины. Поэтому грунт под трубой уплотнен не так сильно, как над трубой.

Зависимость (рис. 7) также демонстрирует, что, когда угол θ меньше 70° и больше 290°, давление

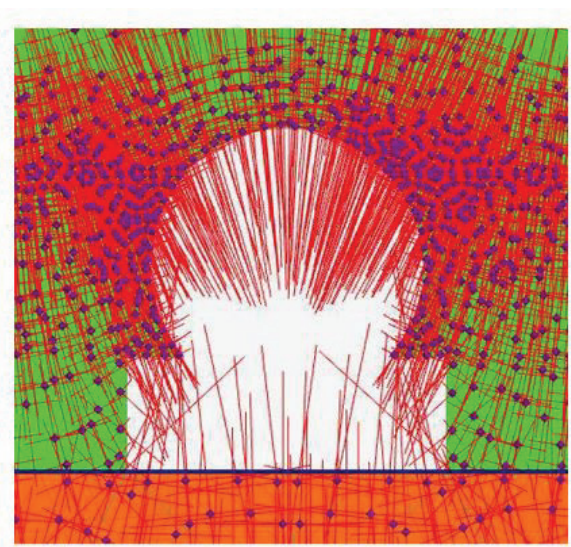


Рис. 6. Диаграмма расчетных точек нормальных напряжений вокруг водоспускной трубы

Fig. 6. Diagram of design points of normal stresses around the culvert

воды превышает нормальное сжимающее напряжение. Минимальное значение ($\sigma_\theta - W$) составляет –49,08 кПа, когда угол θ равен 48°.

Приняты следующие обозначения: σ_θ — нормальное напряжение в точке возле водопропускной трубы с углом θ ; W — давление воды в фильтрационном потоке в точках, расположенных вокруг трубы.

В этих областях может произойти ГР, поэтому необходим поиск технических решений для предотвращения ГР грунта около трубной области и предотвращения трещинообразования, которое является основным фактором возникновения сосредоточенной фильтрации вдоль трубы и потери фильтрационной прочности.

Предложения по контрмерам

Изменить форму сечения водопропускной трубы

Исследователи считают, что форма водопропускной трубы является важным фактором, связанным с неравномерной осадкой рядом с ней, снижением напряжения с обеих сторон трубы и повышенной вероятностью ГР вблизи водопропускной трубы [17, 21]. Поэтому предлагается новая форма водоспускной трубы. В этом случае форма трубы трансформируется, в то время как другие условия, такие как условия нагрузки и граничные условия, сохраняются. Новая форма водопропускной трубы показана на рис. 9.

На рис. 10 представлены точки напряжения вокруг водопропускной трубы при изменении формы поперечного сечения с помощью ПО Plaxis 2D. На рис. 11 приведено распределение нормального напряжения за вычетом давления воды вокруг водопропускной трубы новой формы в тестовом примере. На этом графике в качестве горизонтальной оси координат выбрана ось X , которая отличается от го-

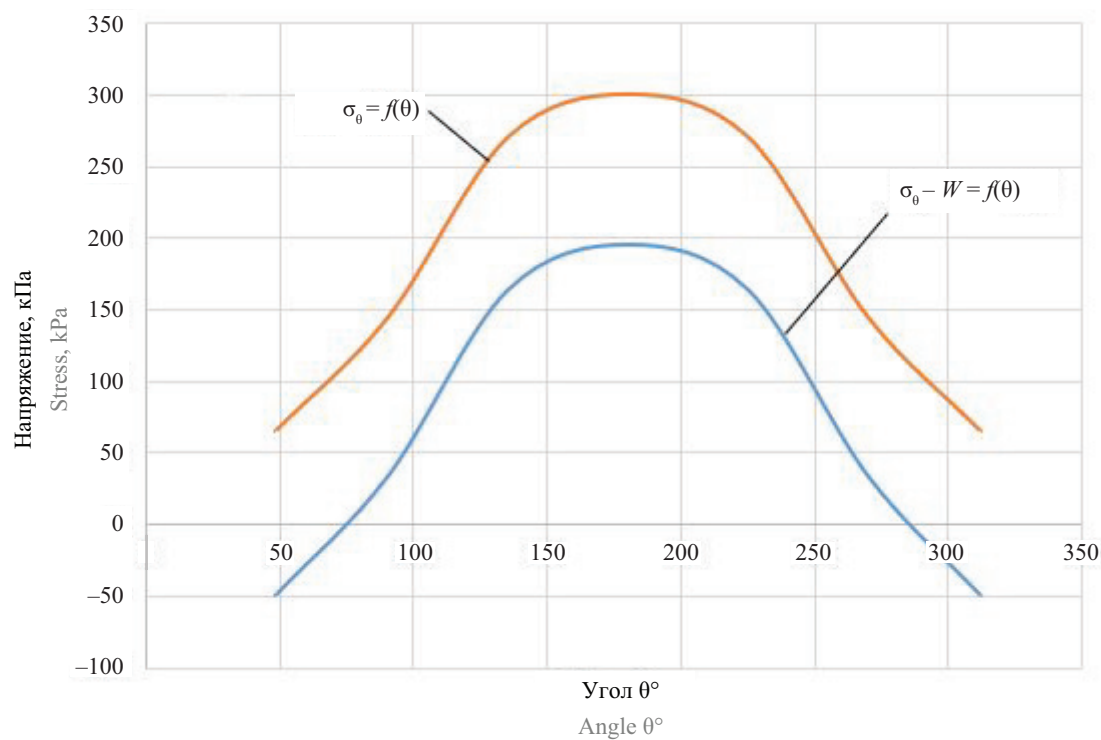


Рис. 7. Зависимости напряжений в грунте около трубной области: красная кривая на графике — $\sigma_{\theta} = f(\theta)$; синяя кривая — $\sigma_{\theta} - W = f(\theta)$

Fig. 7. Dependences of stresses in the soil near the culvert: red curve on the graph — $\sigma_{\theta} = f(\theta)$; blue curve — $\sigma_{\theta} - W = f(\theta)$

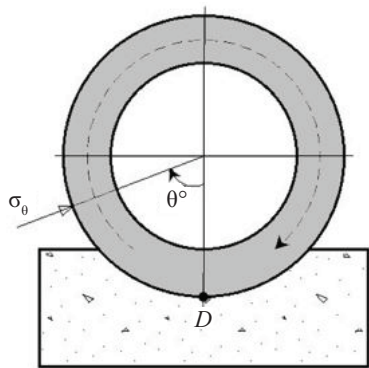


Рис. 8. Порядок отсчета угла θ на схеме водопускной трубы

Fig. 8. The order of counting the angle θ on the culvert

горизонтальной оси координат на рис. 7. Из-за изменения формы водопропускной трубы ось X может быть более подходящей для демонстрации взаимосвязи нормального напряжения и давления воды вокруг водопропускной трубы. Как видно на рис. 11, напряженное состояние вокруг водопропускной трубы претерпело значительные изменения. С обеих сторон водопропускной трубы нормальное напряжение действительно выше, чем давление воды; отсюда можно сделать вывод об отсутствии условий для возникновения ГР грунта на боковых гранях конструкции.

Сравнивая распределение нормального напряжения за вычетом давления воды на рис. 7 и 11, результаты подтверждают, что на НДС вокруг водо-

пропускной трубы значительное влияние оказывает ее форма. Поэтому при проектировании и строительстве водопропускной трубы под плотиной необходимо учитывать выбор соответствующей формы сечения водопропускной трубы, чтобы снизить риск ГР вокруг водопропускной трубы.

Устройство глиняной рубашки вокруг водосборной трубы

Ранее считалось, что устройство глиняной рубашки вокруг водопропускной трубы предназначено только для предотвращения внутренней эрозии, но ученые продемонстрировали, что этот метод также снижает риск гидравлического разрыва [17, 21]. Авторы используют слой глины, чтобы покрыть водопропускную трубу, как показано на рис. 12. На рис. 13 представлены точки напряжения вокруг трубы с помощью ПО Plaxis 2D. Распределение нормального давления за вычетом давления воды ($\sigma_{\theta} - W$) вокруг водопропускной трубы показано на рис. 14. Ясно, что нормальное напряжение больше, чем давление воды. Таким образом, можно сделать вывод, что глиняная насыпь вокруг водопропускной трубы снизила риск ГР вблизи нее, особенно с двух сторон водопропускной трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- ГР может легко произойти, когда нормальное напряжение вокруг водопропускной трубы (особенно

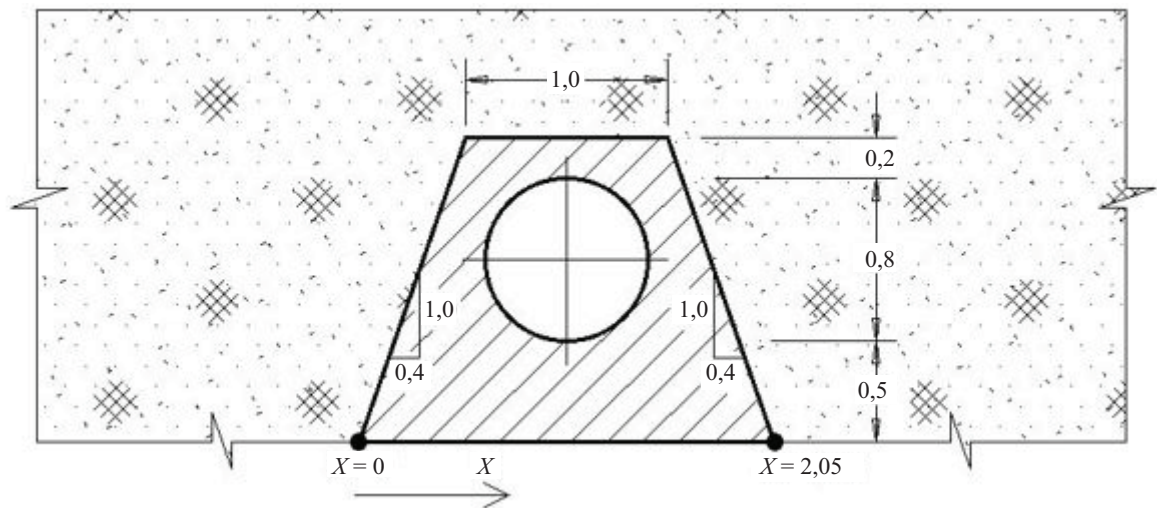


Рис. 9. Изменение формы водопускной трубы. Размеры указаны в метрах
Fig. 9. Changing the shape of the culvert. Dimensions are given in meters

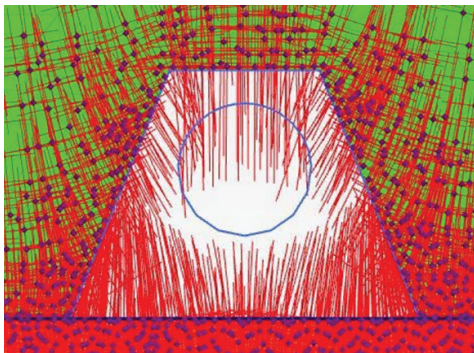


Рис. 10. Точки напряжения вокруг водопропускной трубы при изменении формы поперечного сечения в виде трапеции
Fig. 10. Stress points around the culvert when changing the shape of the cross-section in the shape of a trapezoid

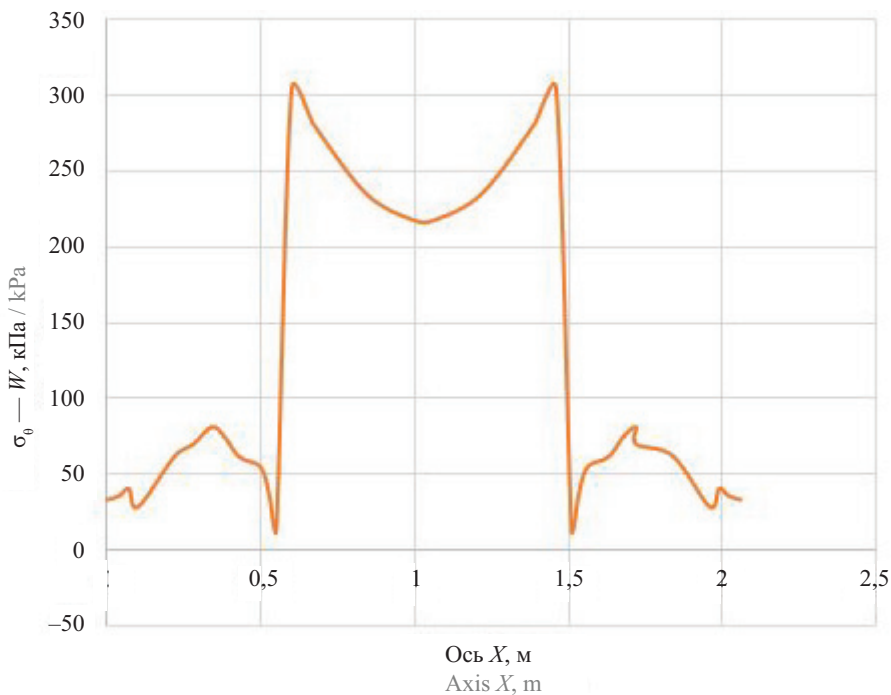


Рис. 11. Распределение нормального напряжения σ_0 за вычетом давления воды W вдоль координатной оси X
Fig. 11. Distribution of normal stress σ_0 minus water pressure W along the coordinate axis X

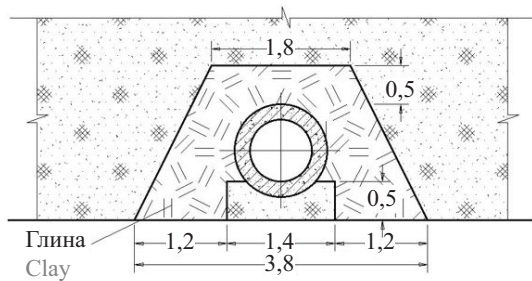


Рис. 12. Устройство глиняной рубашки вокруг водосбросной трубы в виде трапеции. Размеры даны в метрах
Fig. 12. Installation of a clay jacket around the culvert spillway in a trapezoid. Dimensions are in meters

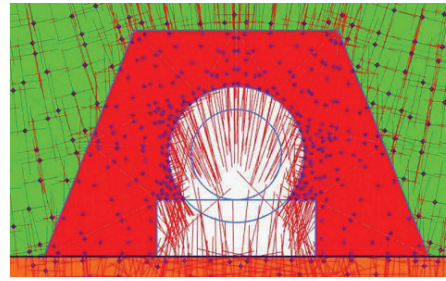


Рис. 13. Точки напряжения вокруг трубы при устройстве глиняной рубашки вокруг водосбросной трубы 2D
Fig. 13. Stress points around the pipe during the construction of a jacket around the 2D culvert spillway

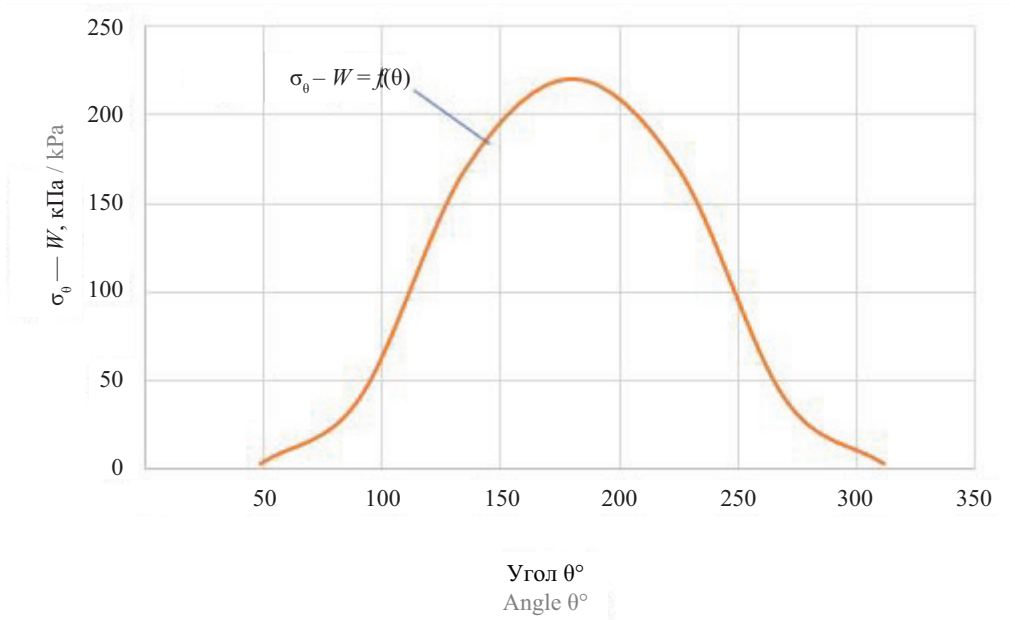


Рис. 14. График напряжений вокруг водопропускной трубы по углу θ в случае устройств глиняной рубашки вокруг водосбросной трубы
Fig. 14. Graph of stresses around the culvert by angle θ in the case of clay jacket around the the culvert

на двух ее сторонах) меньше, чем давление воды, что возможно из-за распора. В исследовании, описанном в этой статье, область вокруг водопропускной трубы, где угол θ (показан на рис. 7) меньше 70° и больше 290° , подвержена риску гидравлического разрыва;

- изменение формы сечения водопропускной трубы и способ устройства глиняной рубашки вокруг водосбросной трубы значительно снизили риск ГР вдоль водопропускной трубы (особенно с двух ее сторон);

- разрушение плотины из-за ГР может привести к серьезному повреждению плотины, а также инфраструктуры, сложившейся в нижнем течении реки. Внедрение методов предотвращения ГР важно для обеспечения безопасных условий работы плотины. Поэтому инженерам-проектировщикам необходимо тщательно изучить методы, чтобы выбрать разумный способ обеспечения безопасности плотины и в то же время подходящий для инвестиционных затрат на строительство.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Schultz B. Role of dams in irrigation, drainage and flood control. *International Journal of Water Resources Development*. 2002; 18(1):147-162. DOI: 10.1080/07900620220121710
2. Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Eu-rope: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*. 2006; 75(3):273-299. DOI: 10.1007/s10584-006-6338-4
3. Van Aalst M.K. The impacts of climate change on the risk of natural disasters. *Disasters*. 2006; 30(1): 5-18. DOI: 10.1111/j.1467-9523.2006.00303.x
4. Zhang Y., Chen D., Chen L., Ashbolt S. Potential for rainwater use in high-rise buildings in Australian cities. *Journal of Environ-mental Management*. 2009; 91(1):222-226. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.08.008
5. Piao S., Ciais P., Huang Y., Shen Z., Peng S., Li J. et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*. 2010; 467(7311):43-51. DOI: 10.1038/nature09364
6. Urama K.C., Ozor N. Impacts of climate change on water resources in Africa: the role of adaptation. *African Technology Policy Studies Network*. 2010; 29:1-29.
7. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*. 2000; 37(5):1000-1024. DOI: 10.1139/t00-030
8. Sharma R.P., Kumar A. Case Histories of Earthen Dam Failures. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013.
9. Vogel A., Courivaud J.-R., Jarecka K. Recent case histories of cascade failures and overflowing events of embankment dams. *4th International Seminar on Dam Protection against Overtopping (Spain)*. 2022. DOI: 10.26077/efbf-4702
10. Ngambi S., Shimizu H., Nishimura S., Nakano R. A fracture mechanics approach to the mechanism of hydraulic fracturing in fill dams. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering (Japan)*. 1998; 195:47-58.
11. Ng K.L., Small J.C. A case study of hydraulic fracturing using finite element methods. *Canadian Geotechnical Journal*. 1999; 36(5):861-875. DOI: 10.1139/t99-049
12. Haeri S., Faghihi D. Predicting Hydraulic Fracturing in Hyttejuvet Dam. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2008; 2.88:40-52.
13. Khanna R., Chitra R. Hydraulic fracturing in core of earth and rockfill dams. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2016; 5(1):13-6-142.
14. Salari M., Akhtarpour A., Ekramifard A. Hydraulic fracturing: a main cause of initiating internal erosion in a high earth-rock fill dam. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021; 15(2):207-219. DOI: 10.1080/19386362.2018.1500122
15. Jaworski G.W., Duncan J.M., Seed H.B. Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981; 107(6):713-732. DOI: 10.1061/AJGEB6.0001147
16. Mhach H.K. *An experimental study of hydraulic fracture and erosion: thesis*. City University, London, 1991.
17. Ngambi S., Nakano R., Shimizu H., Nishimura S. Cause of leakage along the outlet conduit underneath a low fill dam with special reference to hydraulic fracturing. *Rural and Environment Engineering*. 1998; 1998(35):35-46. DOI: 10.11408/jierp1996.1998.35_35
18. Wang J.J., Zhang H.P., Zhao M.J., Lin X. Mechanisms of hydraulic fracturing in cohesive soil. *Water Science and Engineering*. 2009; 2(4). DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2009.04.009
19. Penman A.D.M., Charles J.A., Nash J.K.T.L., Humphreys J.D. Performance of Culvert under Winscar Dam. *Geotechnique*. 1975; 25(4):713-730. DOI: 10.1680/geot.1975.25.4.713
20. Mosadegh A. Buried pipe response subjected to traffic load experimental and numerical investigations. *International Journal of GEOMATE*. 2017; 13(39). DOI: 10.21660/2017.39.91957
21. Tran D.Q. Effects of culvert shapes on potential risk of hydraulic fracturing adjacent to culverts in embankment dams. *International Journal of GEOMATE*. 2018; 16(52). DOI: 10.21660/2018.52.20934

Поступила в редакцию 20 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 7 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Генрих Васильевич Орехов** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704; OrehovGV@mgsu.ru;

Чан Мань Кыонг — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; cuonghtcs@gmail.com.

Вклад авторов:

Орехов Г.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Чан Мань Кыонг — анализ источников литературы, построение экспериментальной модели, анализ полученных результатов, формулирование выводов по статье.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received April 20, 2023.

Adopted in revised form on June 1, 2023.

Approved for publication on July 7, 2023.

B I O N O T E S: **Genrikh V. Orekhov** — Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704; OrekhovGV@mgsu.ru;

Tran Manh Cuong — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; cuonghtcs@gmail.com.

Contribution of the authors:

Genrikh V. Orekhov — the idea of the article, scientific guidance, formulation of the research concept.

Tran Manh Cuong — analysis of sources and literature, construction of an experimental model, analysis of the results obtained, formulation of conclusions on the article.

The authors declare no conflict of interest.