

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 626/627

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.3

Особенности проявления гидравлического разрыва в грунтовых плотинах

Генрих Васильевич Орехов, Чан Мань Кыонг*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в условиях изменения климата феномен необычных дождей и наводнений вызывает широкомасштабные наводнения и приводит к большим потерям людей и имущества. Наиболее уязвимыми сооружениями являются плотины и водохранилища. Прорыв плотины может привести к катастрофе, угрожающей жизни людей и социально-экономической деятельности. Существует много причин разрушения плотины, из которых гидравлический разрыв (ГР) считается одной из наиболее вероятных, поскольку он вызывает сосредоточенную фильтрацию, приводящую к риску разрушения плотины. Гидравлический разрыв — это процесс, при котором трещины образуются в грунте или камне, а затем распространяются под давлением воды. Гидравлический разрыв привлекает внимание ученых. Цель исследования — синтез мнений ученых на сегодняшний день о явлении гидроразрыва и методах его предотвращения в земляных плотинах.

Материалы и методы. Проанализированы литературные источники, в которых рассматривается ГР.

Результаты. Гидравлический разрыв тесно связан с явлениями неравномерной осадки грунтов плотины и строительных конструкций. В грунтовых плотинах неравномерная осадка часто возникает в зонах между насыпным грунтом плотины и бортовыми массивами створа плотины; насыпным грунтом и бетонными конструкциями, такими как водопропускные трубы и водосбросы, фундаментные элементы конструкций; водонепроницаемым ядром плотины и примыкающими к нему зонами грунта. На основе анализа причин возникновения ГР некоторые исследователи предложили меры по снижению риска его возникновения.

Выводы. Гидравлический разрыв — образование трещин и полостей в грунтовом массиве, которые способствуют формированию путей сосредоточенной фильтрации. Появление ГР увеличивает вероятность нестабильности фильтрации в плотине, что влияет на безопасность плотины и может привести к серьезному повреждению. Внедрение методов предотвращения ГР важно для обеспечения безопасных условий работы плотины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фильтрация, грунтовая плотина, гидравлический разрыв, неравномерная осадка, возникающее усилие, сосредоточенная фильтрация, прорыв плотины

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орехов Г.В., Чан Мань Кыонг. Особенности проявления гидравлического разрыва в грунтовых плотинах // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 1. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.3

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

Stress-strain state of some special places in earth dam from viewpoint of hydraulic fracturing

Genrikh V. Orekhov, Tran Manh Cuong*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In the current process of climate change, the phenomenon of unusual rainfall and flooding is causing widespread flooding and causing great loss of life and property. In addition, the most vulnerable structures are dams and reservoirs. A dam failure causes a disaster that can threaten human lives and entire socio-economic activities. There are many causes of dam failure, of which hydraulic fracturing is considered one of the most likely causes as it causes concentrated seepage leading to the risk of dam failure. Hydraulic fracturing is a process in which cracks form in soil or rock and then propagate under water pressure. Hydraulic fracturing is not a new topic, nor is it an old one, receiving a lot of attention from scientists, but it is still a controversial issue. Many opinions are given. This paper aims to summarize the mechanism of hydraulic fracturing based on previous studies and at the same time proposes some methods to prevent hydraulic fracturing in an earthen dam.

Materials and methods. Literature analysis of sources related to the phenomenon of hydraulic fracturing.

Results. Hydraulic fracturing is closely related to the phenomena of differential settlement of dam soils and building structures. In earth-fill dams, the phenomenon of differential settlement often occurs in the areas between the fill soil of the dam and the side masses of the dam site, fill soil and concrete structures such as culverts and spillways, foundation structural

elements, the impermeable core of the dam and adjacent soil zones. Based on an analysis of the causes of hydraulic fracturing, a number of measures were proposed to reduce the risk of hydraulic fracturing.

Conclusions. Hydraulic fracturing, that is, the formation of cracks and cavities in the soil mass, which contribute to the formation of concentrated seepage paths. The occurrence of hydraulic fracturing increases the likelihood of seepage instability in the dam, which affects the safety of the dam and can lead to serious damage. Implementing hydraulic fracturing prevention techniques is critical to ensuring safe dam operating conditions.

KEYWORDS: seepage, earth dam, hydraulic fracturing, differential settlements, arching action, concentrated seepage, dam failure

FOR CITATION: Orekhov G.V., Tran Manh Cuong. Stress-strain state of some special places in earth dam from viewpoint of hydraulic fracturing. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(1):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.3

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время весь мир столкнулся с проблемами изменения климата, в том числе с явлениями дождя и паводка сверх обычных норм, что сильно влияет на сток и гидрологический режим, вызывает опасность для земляных плотин и водохранилищ [1]. Поэтому обеспечение безопасности плотины актуально.

Аварии и разрушения, возникающие при эксплуатации плотин, наносят серьезный ущерб не только конструкции гидротехнического сооружения, но и территориям, расположенным со стороны нижнего бьефа. Последний во много раз превышает ущерб, нанесенный конструкции, на восстановление может уйти много лет. Например, при прорыве плотины Puentes на р. Segura (Испания) в 1802 г. погибло 608 человек, разрушено 909 жилых домов [2]. Прорыв земляной плотины South Fork (США) в 1862 г. привел к ущербу 4 млн долларов и гибели 2500 человек [3].

Существует много причин разрушения плотин, таких как ошибки проектирования, строительства, выбор неподходящих материалов, природные или человеческие факторы и т.д. [4]. В ряде случаев аварии на грунтовых плотинах возникают в результате проявления гидравлического разрыва (ГР), который служит одной из наиболее вероятных причин, поскольку вызывает сосредоточенную фильтрацию, приводящую к риску прорыва плотины, особенно при первом заполнении водохранилища [5, 6]. Однако ГР в земляных плотинах досконально не изучен. Кроме того, остается дискуссионным вопрос о механизме ГР, а также выработке мер по его предотвращению. Данная статья посвящена обсуждению механизма возникновения и развития ГР, поиску технических решений по его предотвращению в грунтовых плотинах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Механизм возникновения гидравлического разрыва в грунтовых плотинах

Гидравлический разрыв описывается как процесс, при котором трещины образуются в грунте или камне, а затем развиваются под давлением воды [7]. Это явление в основном интенсивно из-

учается в нефтяной и газовой промышленности для повышения производительности производства и экономической эффективности [8]. ГР представляет собой сложную и опасную проблему в строительстве плотин, особенно грунтовых.

Гидравлический разрыв теоретически может происходить в однородных грунтовых плотинах, но вероятность его возникновения будет выше, если материал неоднороден с точки зрения деформации и фильтрации. При изучении возможных причин разрушения грунтовых плотин J.L. Sherard и соавт. (1986) кратко разъяснили лежащий в основе механизм, с помощью которого ГР вызывает сосредоточенную фильтрацию в грунтовых плотинах [5]. Исследования показали, что из-за различных деформаций (осадков), возникающих усилий в теле плотины образуются трещины (как видимые, так и невидимые). В то же время такие явления (неравномерная осадка, возникающее усилие) приводят к перераспределению внутренних напряжений на отдельных участках насыпных грунтовых плотин. В таких областях минимальное главное напряжение снижается почти до нуля или даже до растягивающего напряжения. Эти области называются зонами низкого сжимающего напряжения.

При заполнении водохранилища уровень воды в водохранилище поднимается вверх, а в последующем увеличивается давление воды в грунтовой плотине. В зонах низкого сжимающего напряжения грунта давление воды становится выше, чем главное напряжение. При этом фильтрация в плотине проникает в существующие трещины (даже невидимые), образовавшиеся ранее, а затем вызывает концентрацию напряжений в вершинах трещин. При этом условия напряжения в плотине изменяются, а трещины раскрываются или развиваются. Объяснение гласит, что, поскольку предел прочности грунта на растяжение очень мал или отсутствует, трещины легко распространяются, что приводит к потере безопасности плотины.

Затем исследователи разработали критерии для прогнозирования и оценки риска ГР в плотине. Гидравлический разрыв возникает, когда он удовлетворяет следующему условию [5, 6, 9]:

$$\sigma_3 < W, \quad (1)$$

где σ_3 — минимальное главное напряжение в грунтовой плотине, может быть определено путем мониторинга на месте возведения плотины (т.е. опытным путем) или с помощью численного моделирования; W — давление воды в рассматриваемой точке плотины, которое определяется как:

$$W = \gamma_w h_w,$$

где γ_w — удельный вес воды; h_w — глубина по вертикали от депрессионной линии земной плотины до рассматриваемой точки.

Поскольку депрессионная кривая распространяется от верхнего бьефа к нижнему, то значение давления воды в горизонтальных сечениях плотины падает от верхнего бьефа к нижнему. Отсюда следует, что процессу ГР наиболее подвержены массы грунта плотины, расположенные ближе к верхнему бьефу.

Предлагаемые критерии гидравлического разрыва в грунтовой плотине

Вероятно, В. Lofquist (1957) был первым, кто предсказал возникающие усилия в грунтовой плотине с непроницаемым ядром, приводящие к риску образования горизонтальных трещин [10]. Он привел примеры двух плотин, в которых измеренное вертикальное давление в ядрах составляло половину от давления в грунтовых слоях тела плотины. Такое уменьшение напряжения из-за неравномерной осадки в различных элементах плотины можно назвать возникающими усилиями деформационных

процессов. Это утверждение запишем следующим образом:

$$\sigma_r = 2\sigma_a,$$

где σ_r — напряжение грунта плотины; σ_a — напряжение ядра плотины.

После разрушения плотины Hyttejuvet (1965) I. Torblaa и В. Kjoernsli (1968) постулировали механизм ГР земляных плотин [11]. Исследователи предположили, что в начале заполнения сжимающие напряжения существуют по всему ядру и, следовательно, нет открытых трещин. Однако при заполнении горизонтальные трещины могут неожиданно образоваться в результате ГР в местах, где суммарное вертикальное напряжение в ядре значительно ниже, чем давление оболочки из-за возникающего усилия между ядром и менее сжимаемой оболочкой. Во время заполнения водой давление, действующее на верхней границе ядра, может превышать общее напряжение, действующее в некоторой плоскости, через ядро, как показано на рис. 1.

J.L. Sherard (1973) указал, что при определенных условиях давление, действующее на верхнюю часть плотины, может вызвать открытие существующих закрытых трещин или создать новые трещины [12, 13]. Автор предположил, что ГР в ядре может произойти всякий раз, когда суммарные главные напряжения на определенной отметке в ядре достаточно низки по сравнению с давлением воды на той же отметке. Внутренние напряжения, необходимые для ГР, могут иметь место при первом заполнении водохранилищ или развиваться позже в результате

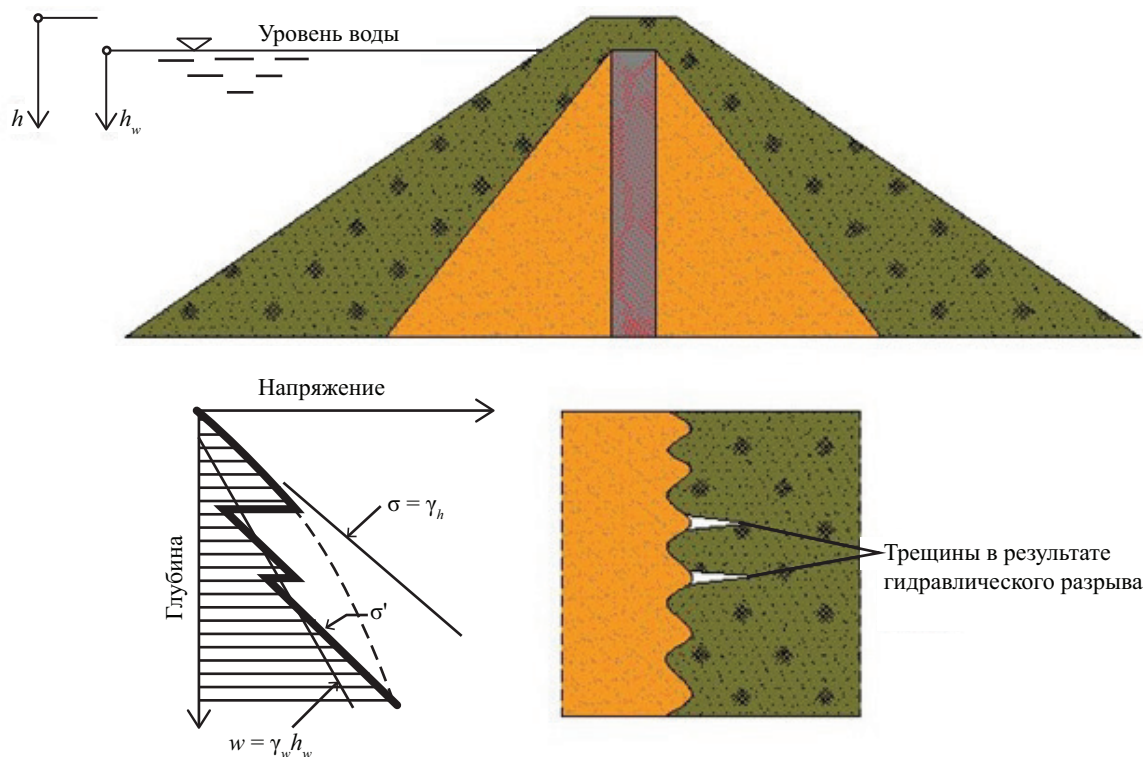


Рис. 1. Развитие трещин в ядре: σ — напряжение грунта плотины; σ' — напряжение грунта в зоне, примыкающей к ядру; w — давление воды

продолжающейся неравномерной осадки материала тела плотины.

Несколько исследователей предполагали «насыщенную осадку» как другой механизм трещин ядра при гидравлическом разрыве [14, 15]. Насыщенная осадка развивается при заполнении водохранилища, когда слабоуплотненный грунт или предшествующие зоны и слои рыхлого материала насыщаются и уплотняются под собственным весом, прежде чем сухой или более плотный грунт, возвышающийся над ним, успевает насытиться. Таким образом, в месте расположения кривой депрессии образуется разрыв или трещина, и любое последующее повышение уровня воды позволяет воде проникнуть в эту трещину, что приводит к эрозии.

По вопросу о роли трещин в возникновении ГР в грунтовых плотинах во многих исследованиях делается вывод о важности предварительно образовавшихся трещин [6, 11]. Можно сказать, что иницирование ГР в насыпных плотинах определяется двумя важными условиями. Первое — это условия, при которых напряжение в некоторых локальных зонах грунтовых плотин снижается, способствуя развитию гидравлического разрыва. Второе — наличие в плотинах трещин, которые играют роль начальных трещин ГР.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взаимосвязь между гидравлическим разрывом и явлениями неравномерной осадки и возникающего усилия

Считается, что ГР тесно связан с явлениями неравномерной осадки и возникающего усилия [16]. В грунтовых плотинах неравномерная осадка часто возникает в зонах между насыпным грунтом и устоями плотины, насыпным грунтом и бетонными конструкциями, такими как водопропускные трубы и водосбросы, непроницаемые ядра и их обочины, а также противифльтрационные траншеи и примыкающие фундаменты [6]. В этих зонах, поскольку материалы имеют разные модули

упругости, материалы будут оседать по-разному, и напряжение в зонах может уменьшиться до нуля или даже до растяжения. Снижение напряжения за счет неравномерной осадки в некоторых локальных зонах называется явлением возникающего усилия. При этом условии выполняется соотношение в уравнении (1). В то же время из-за уменьшения напряжения в таких зонах за счет возникающего усилия могут образовываться некоторые трещины. Можно сказать, что снижение напряжения наряду с образованием трещин создает условия, способствующие иницированию гидравлического разрыва при заполнении водохранилища плотины, даже при первом заполнении.

Неравномерная осадка и возникающее усилие вблизи устоев плотины

А. Casagrande (1951) использовал анализ методом конечных элементов, чтобы продемонстрировать влияние уклона устоев и деформации фундамента на участки с низким напряжением и трещинами в земляной плотине [17]. На рис. 2 представлены условия, при которых трещины возникают вблизи крутого устоя жесткого скального основания из-за неравномерной осадки и возникающего усилия. В некоторых недавних исследованиях К. Ноег, Н. Буй, К. Не и соавт. также приходят к такому выводу [18–20].

Неравномерная осадка и возникающее усилие вблизи водопропускной трубы

На рис. 2 показано, что из-за влияния неравномерной осадки вблизи водопропускной трубы появляются участки с низкими напряжениями и трещины. Это явление было подтверждено многими исследователями как теоретическими, так и экспериментальными методами [5, 6, 21]. Трещины, образующиеся вдоль водопропускной трубы, создают сосредоточенную фильтрацию, что приводит к разрушению плотины.

Кроме того, J.L. Sherard также предположил, что трудно идеально уплотнить грунт, чтобы не было

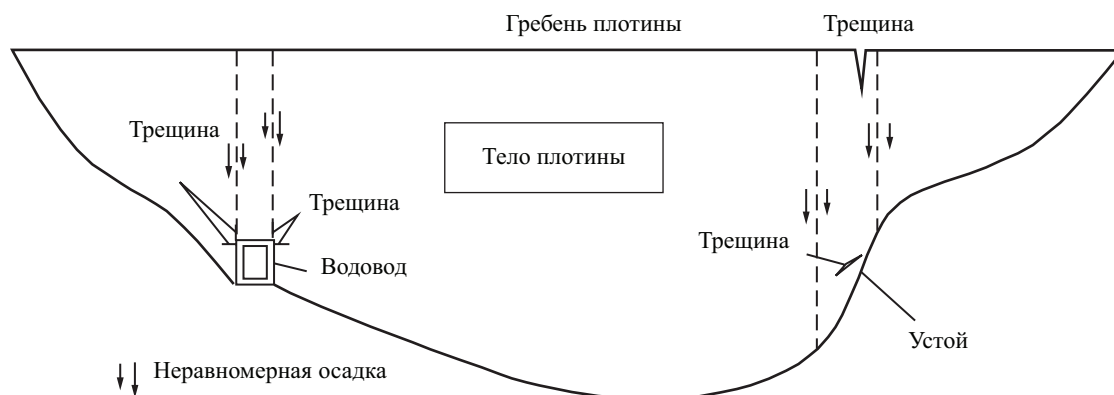


Рис. 2. Продольный разрез плотины — формирование зон низкого напряжения и трещин вблизи водовода и устоя в насыпной плотине

зазоров или разрывов на границе раздела между грунтом и материалами водопропускных сооружений или устоев плотин, например, когда водопропускное сооружение имеет неподходящую форму (к примеру, форму трубы) [13]. Поэтому могут существовать какие-то зазоры или разрывы, играющие роль исходных трещин для возникновения ГР. Следовательно, риск ГР становится выше, чем в случае насыпных плотин, имеющих подходящие формы водопропускных труб.

Неравномерная осадка и возникающее усилие в земляной плотине с ядром

На рис. 3 приведен механизм образования трещин в непроницаемых ядрах и траншеях за счет возникновения неравномерной осадки и возникающего усилия между ядрами, траншеями и грунтом, прижимаемыми к ним. Из-за эффектов неравномерной осадки и возникающего усилия трещины легко образуются и распространяются из-за ГР через ядро и траншеи. Считается, что этот механизм связан с авариями многих земляных каменно-набросных плотин, особенно с историческими плотинами, спроектированными с очень узкими непроницаемыми ядрами и узкими отсечными траншеями, построенными для снижения порового давления воды во время строительства, например, плотины Dale Dyke (Англия), Hyttejuvet (Норвегия), Balderhead (Англия).

Неравномерная осадка и возникающее усилие из-за других причин

Некоторые зоны низкого напряжения и трещины также встречаются в насыпных плотинах из-за неравномерной осадки в результате существования сильно сжимаемого слоя в фундаменте плотины [22]. Однако риск образования таких трещин можно значительно уменьшить, если перед началом строительства провести тщательные геологические исследования. Кроме того, усадка насыпи, недостаточное уплотнение и землетрясения могут быть другими факторами, связанными с образованием трещин в любом месте плотин.

Разрушение плотины и аварии под механизмом гидравлического разрыва

Исследования, основанные на статистике, показывают, что внутренняя эрозия или суффозия, вызванная сосредоточенной фильтрацией, является одной из основных причин разрушения грунтовой плотины или аварий [23–25]. Гидравлический разрыв считается наиболее вероятным механизмом, вызывающим суффозию [5]. В таблице представлена статистическая база данных о некоторых разрушениях плотин в мире, связанных с гидравлическим разрывом. Чтобы объяснить это, Ngambi опирался на теорию механики разрушения и результаты лабораторных испытаний, чтобы предположить, что сопротивление образцов нарушенного грунта гидравлическому разрыву (соответствующее сопротивлению насыпи ГР плотин вскоре после завершения их строительства) было очень низким и значительно меньше, чем у ненарушенных образцов грунта. Таким образом, видно, что плотины на ранних стадиях после строительства более подвержены ГР, чем плотины, находящиеся в эксплуатации длительное время.

Анализируя информацию об инцидентах, произошедших с построенными грунтовыми плотинами в разные годы, можно сделать вывод, что разрушения происходили в подавляющем числе случаев в местах, где могли проходить процессы гидроразрывного характера, описанные выше. Именно в местах, связанных с переходными зонами в противofiltrационном ядре, в бетонных сооружениях водосбросных систем трубчатой конструкции может возникать гидроразрыв в материале плотины, контактирующем с отмеченными элементами плотины по причинам, указанным выше.

Мероприятия по снижению рисков гидравлического разрыва

Очевидно, что ГР опасен и угрожает безопасности плотины. Поэтому важно внедрить методы предотвращения обрушения плотины из-за гидравлического разрыва.

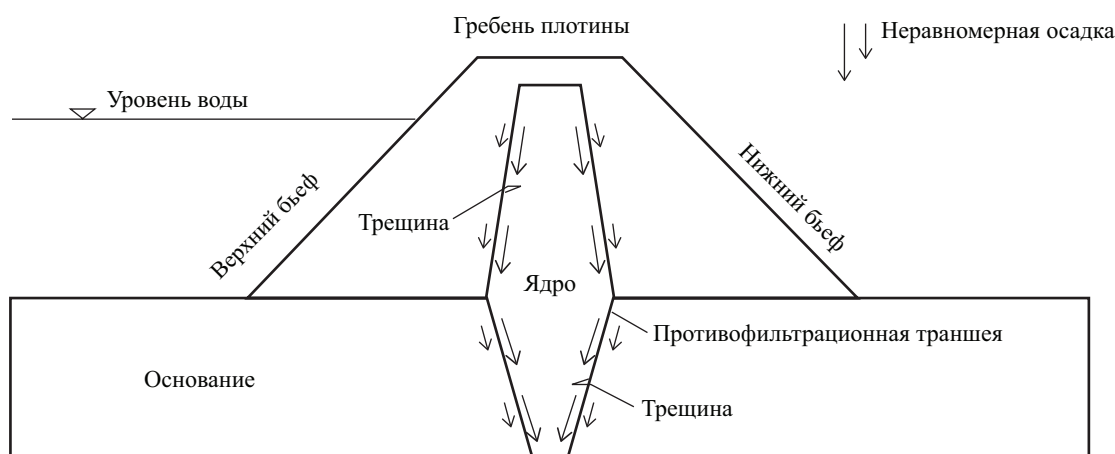


Рис. 3. Поперечный разрез плотины — формирование зон низкого напряжения и трещин в плотине с ядром

Статистика разрушений плотин

Плотина (страна)	Год завершения строительства	Год инцидента или разрушения	Место разрушения на теле плотины	Ссылка
Balderhead (Великобритания)	1964	1967	В области ядра	Vaughan, 1971
Winscar (Великобритания)	1975	1976–1980	В области водопропускной трубы и устоя	Routh, 1988
Horndoyne (Великобритания)	1990	1990	В области водопропускной трубы	Charles, 2005
Greenbooth (Великобритания)	1962	1983	В области устоя	Flemming и Rossington, 1985
Carno Lower (Великобритания)	1911	2005	В области водопропускной трубы	Rowland и Powell, 2006
Leader Middle Clear Boggy Creek Site 15 (США)	1965	1966, 1968	В области противофильтрационной траншеи	Sherard, 1972
Upper Red Rock Creek Site 42 (США)	1966	1967	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Caney Coon Creek Site 2 (США)	1964	1964	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Upper Red Rock Creek Site 48 (США)	1964	1964	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Upper Clear Boggy Creek Site 53 (США)	1963	1964	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Little Wewoka Creek Site 17 (США)	1960	1960	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Owl Creek Site 13 (США)	1957	1957	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Owl Creek Site 7 (США)	1957	1957	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Leader Middle Clear Boggy Creek Site 29 (США)	1962	1970	В области водопропускной трубы	Sherard, 1972
Нyttejuvet (Норвегия)	1965	1966	В области ядра	Torblaa и Kjoernsli, 1968
Teton (США)	1975	1976	В области противофильтрационной траншеи	Независимая комиссия рассмотрит причину прорыва плотины Тетон, 1976
Viddalsvatn (Норвегия)	1972	1973	В области ядра	Vestad, 1976
Yard’s Creek Upper Reservoir (США)	1965	1965	В области ядра	Sherard, 1973
KE 2/20 REC (Вьетнам)	2008	2009	В области водопропускной трубы и устоя	Nguyen и Ho, 2009

J.L. Sherard (1992) предположил, что хорошо спроектированный фильтр (рис. 4) имеет первостепенное значение, а другие меры по уменьшению неравномерной осадки трещин имеют второстепенное значение [26]. Подходящим фильтром является тот, который способен безопасно контролировать сосредоточенные фильтрации не только из-за механиз-

ма эрозии, но и из-за ГР. Исследование S. Ngambi (1998), основываясь на результатах лабораторных испытаний, также подтвердило важность фильтра в предотвращении ГР [27]. В настоящее время подходящий фильтр считается требованием среди стандартов проектирования и строительства грунтовых плотин во многих странах.

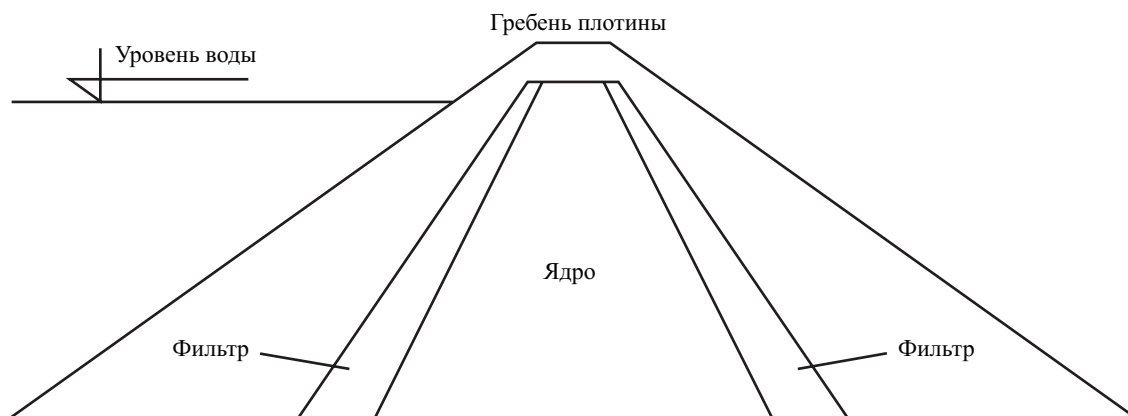


Рис. 4. Мероприятие по снижению риска возникновения гидравлического разрыва в плотине с ядром

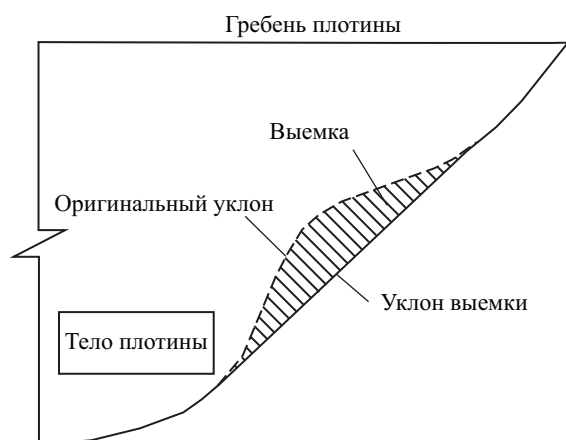


Рис. 5. Мероприятие по снижению риска возникновения гидравлического разрыва вблизи устоев плотин

В целях снижения вероятности неравномерной осадки в плотине и снижения риска ГР в исследовании J.L. Sherard (1992) были рекомендованы некоторые меры.

1. Для гидравлического разрыва, происходящего вблизи устоев плотин, J.L. Sherard предложил выкопать устои, чтобы сделать более пологие склоны и устранить резкие изменения или неровности в устоях или основаниях плотин (рис. 5). Целью этой меры является снижение риска образования сводов вблизи устоев плотин, что приводит к образованию трещин и зон растяжения в плотине.

2. Чтобы предотвратить ГР рядом с водопропускными трубами, J.L. Sherard посоветовал на практике применять другие формы водопропускных труб. Рекомендуемые формы водопропускных труб должны иметь слегка наклонные наружные поверхности. В частности, J.L. Sherard (1992) и S. Ngambi (1997) предложили водопропускные трубы с наклонными внешними откосами в соотношении один в горизонтальном направлении к восьми или десяти в вертикальном направлении (т.е. уклон наружных наклонных стен от 0,1 до 0,125) [9, 26].

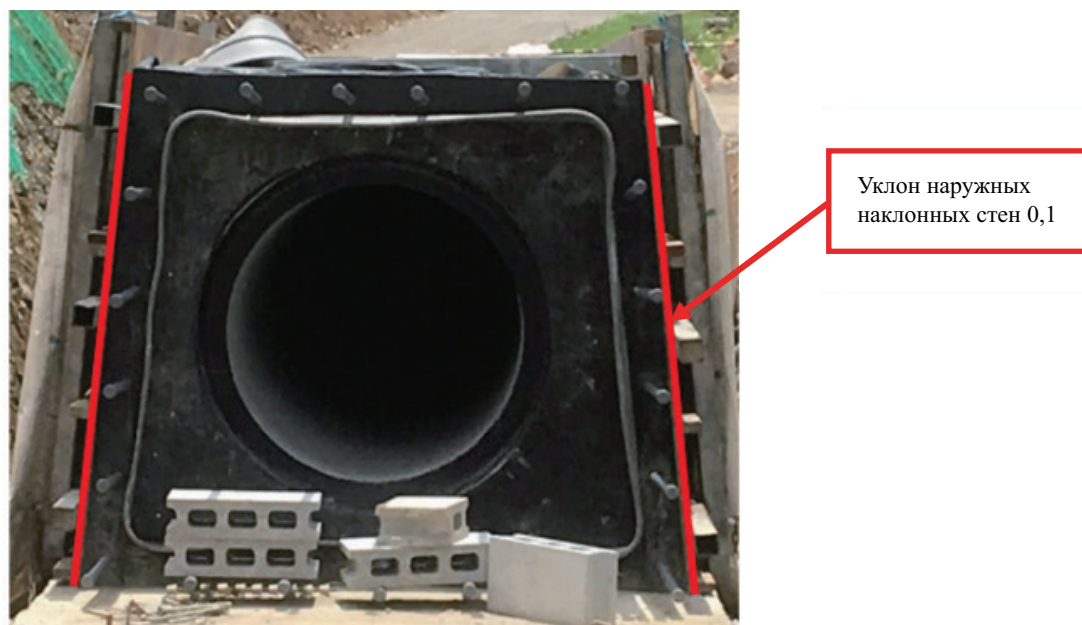


Рис. 6. Текущая общая форма водопропускной трубы грунтовой плотины в Японии с наклонными внешними стенками с уклоном 0,1

В настоящее время среди множества стандартов проектирования и строительства заглубленных водопропускных труб в насыпных плотинах, используемых в развитых странах (Япония и США), также рекомендуется, чтобы заглубленные водопропускные трубы имели наружные наклонные стены с уклоном от 0,1 до 0,3 (рис. 6). В недавних исследованиях D.Q. Tran (2018) предложил критический уклон наклонных стен не менее 0,4 [28]. Многие исследователи пришли к выводу, что изменение формы водопропускной трубы является общепринятой и эффективной мерой для предотвращения риска возникновения ГР вблизи водопропускных труб [6, 26, 29], потому что изменение формы не только эффективно снижает возникающее усилие, но и способствует уплотнению насыпного грунта на внешних поверхностях водопропускных труб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании некоторых исследований по гидравлическому разрыву, упомянутых выше, можно сделать следующие выводы.

Гидравлический разрыв представляет собой реальную потенциальную опасность для земляных

плотин, особенно при первом заполнении. Рассмотренные в статье особенности поведения материала грунтовых плотин, главным образом в местах переходных зон и сопряжения с другими элементами, предполагают процессы, связанные с ГР, возникающим при давлении воды фильтрационного потока. Неподходящая форма водопропускной трубы, наклонные устои, слишком узкие непроницаемые траншеи — все это увеличивает вероятность ГР плотины. Механизм процессов, связанных с гидравлическим разрывом в теле плотины, до конца не изучен, но уже сейчас ясно, что при проектировании новых водоподпорных сооружений из грунта необходимо обращать внимание на вышеприведенные факторы, которые связаны с безопасностью сооружения и его долгосрочной безаварийной работой.

Несмотря на то что большое количество исследований были сосредоточены на мерах по безопасному контролю риска происшествий с плотинами из-за гидравлического разрыва и рекомендованы определенные меры, эффективность некоторых мер плохо доказана или не получила полного согласия. Поэтому необходимо более внимательно изучить мероприятия по повышению защищенности плотин от гидравлического разрыва.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F.* Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis // *Climatic Change*. 2006. Vol. 75. Issue 3. Pp. 273–299. DOI: 10.1007/s10584-006-6338-4
2. *Саломова К.Д., Ахмедов М.А.* Статистический анализ повреждений и разрушений грунтовых плотин // *Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды* : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 2018. С. 104–113. EDN YNUXAD.
3. *Гельфер А.А.* Причины и формы разрушения гидротехнических сооружений. Л. ; М. : Онти, 1936. 320 с.
4. *Городниченко В.О.* Изучение рисков разрушения плотины // *Аллея науки*. 2019. Т. 1. № 9 (36). С. 102–105. EDN JBHDPR.
5. *Sherard J.L.* Hydraulic fracturing in embankment dams // *Journal of Geotechnical Engineering*. 1986. Vol. 112. Issue 10. Pp. 905–927. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:10(905)
6. *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. Vol. 1998. Issue 35. Pp. 35–46. DOI: 10.11408/jierp1996.1998.35_35
7. *Mhach H.K.* An experimental study of hydraulic fracture and erosion : doctoral thesis. City University London, 1999.
8. *Маннанов И.И., Гапунова Л.И.* Влияние фильтрационных параметров пласта на дополнительную добычу нефти при кислотном гидроразрыве // *Территория Нефтегаз*. 2015. № 12. С. 124–127. EDN VOLPFD.
9. *Ng K.L., Small J.C.* A case study of hydraulic fracturing using finite element methods // *Canadian Geotechnical Journal*. 1999. Vol. 36. Issue 5. Pp. 861–875. DOI: 10.1139/t99-049
10. *Lofquist B.* Discussion on cracking in earth dams // *Proceedings of the 4th international conference of soil mechanics and foundation engineering*. London UK, 1957. Pp. 261–262.
11. *Torblaa I., Kjoernsli B.* Leakage through horizontal cracks in the core of Hyttejuvet Dam. Norwegian Geotechnical Institute, 1968. Vol. 80. Pp. 39–47.
12. *Vaughan P.R.* Cracking of embankment dam cores and the design of filters for their protection // *Lecture given in Madrid and published in the Bulletin of Sociedad Espanola de Mecanica del Suelo Y Cementaciones*. 1976.
13. *Sherard J.L.* Embankment dam cracking // *Hirschfeld, R. C. and Poulos, S. J., Eds., Embankment-Dam Engineering (Casagrande Volume)*. John Wiley, New York, 1973. Pp. 324–328.
14. *Leonards G.A., Davidson L.W.* Reconsideration of failure initiating mechanisms for Teton dam // *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 1984. Vol. 31.

15. Mesri G., Ali S. Discussion of “Hydraulic Fracturing in Embankment Dams” by James L. Sherard (October, 1986, Vol. 112, No. 10) // *Journal of Geotechnical Engineering*. 1988. Vol. 114. Issue 6. Pp. 742–746. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1988)114:6(742)
16. Zhu J., Ji E., Wen Y., Zhang H. Elastic-plastic solution and experimental study on critical water pressure inducing hydraulic fracturing in soil // *Journal of Central South University*. 2015. Vol. 22. Issue 11. Pp. 4347–4354. DOI: 10.1007/s11771-015-2983-y
17. Casagrande A. Notes on the design of earth dams. Harvard University, Department of Engineering, 1951.
18. He K., Fell R., Song C. Transverse cracking in embankment dams resulting from cross-valley differential settlements // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. Issue 3. Pp. 995–1021. DOI: 10.1080/19648189.2019.1691663
19. Bui H., Fell R., Song C. Two and three dimensional numerical modeling of the potential for cracking of embankment dams during construction. Sydney, Australia, 2004. 123 p.
20. He K., Song C., Fell R. Assessing potential cracking zones in embankment dams. Southern Cross University, Lismore, NSW, 2014. Pp. 721–726.
21. Kobayashi N., Mochida J., Sumida Y., Yoshitake Y. Evaluation of arching action generated in the backfill between outlet conduit and existing embankment // *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*. 2012. Vol. 80. Pp. 223–230.
22. Narita K. Design and construction of embankment dams. Department of Civil Engineering, Aichi Institute of Technology, 2000.
23. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents // *Canadian Geotechnical Journal*. 2000. Vol. 37. Issue 5. Pp. 1000–1024. DOI: 10.1139/t00-030
24. Stematiu D. Dam safety management. Bucuresti Conspress, 2009.
25. Charles J.A. Delivering benefits through evidence: lessons from historical dam incidents. Project. Environment Agency, Horizon House, ыDeanery Road, Bristol, 2011.
26. Sherard J.L. Trends and debatable aspects in embankment dam engineering // *Embankment Dams*, ASCE. 1992. Pp. 416–422.
27. 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. Vol. 195. Pp. 47–58.
28. Tran D.Q. Effects of culvert shapes on potential risk of hydraulic fracturing adjacent to culverts in embankment dams // *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 16. Issue 52. DOI: 10.21660/2018.52.20934
29. Tran D.Q. Research on cause of dam failure from viewpoint of hydraulic fracturing — case study of a dam failure in Vietnam // *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 14. Issue 41. DOI: 10.21660/2018.41.57454

Поступила в редакцию 28 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 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 и научное редактирование текста.

Чан Мань Кыонг — сбор и обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

At present, the whole world is facing the problems of climate change, including the phenomena of rainfall and flooding in excess of normal norms, which strongly affects the runoff and hydrological regime, and causes

danger to earthen dams and reservoirs [1]. Therefore, ensuring dam safety is relevant.

Accidents and failures occurring during dam operation cause serious damage not only to the structure of the hydraulic structure, but also to the downstream

areas. The latter is many times greater than the damage caused to the structure and can take many years to repair. For example, when the Puentes dam on the Segura river (Spain) burst in 1802, 608 people died and 909 residential houses were destroyed [2]. The breach of the South Fork earth dam (USA) in 1862 resulted in damage of \$4 million and the death of 2,500 people [3].

There are many causes of dam failure such as design errors, construction errors, selection of unsuitable materials, natural or human factors, etc. [4]. In some cases, earth dam failures are caused by hydraulic fracture (HF), which is one of the most likely causes because it causes concentrated seepage leading to the risk of dam failure, especially when the reservoir is first filled [5, 6]. However, HF in earthen dams has not been thoroughly studied. In addition, the mechanism of hydraulic fracturing and the development of measures to prevent it remain a matter of debate. This paper is devoted to the discussion of the mechanism of the occurrence and development of hydraulic fracturing and to the search for technical solutions to prevent it in earth dams.

MATERIALS AND METHODS

Mechanism of occurrence of hydraulic fracture in earth dams

Hydraulic fracturing is described as a process where cracks form in soil or rock and then develop under water pressure [7]. This phenomenon is mainly intensively studied in the oil and gas industry to improve production productivity and economic efficiency [8]. HF is a complex and dangerous problem in dam construction, especially in earth dams.

Hydraulic fracture can theoretically occur in homogeneous earth dams, but the probability of its occurrence will be higher if the material is inhomogeneous in terms of deformation and seepage. In studying the possible causes of failure of earth dams, J.L. Sherard et al. (1986) briefly explained the underlying mechanism by which HF causes concentrated filtration in earth dams [5]. Studies have shown that due to various deformations (settlement), forces occurring, cracks (both visible and invisible) are formed in the dam body. At the same time, such phenomena (non-uniform settlement, arising forces) lead to redistribution of internal stresses in certain areas of embankment earth dams. In such areas, the minimum principal stress is reduced to almost zero or even tensile stress. These areas are called low compressive stress zones.

When the reservoir is filled, the water level in the reservoir rises upwards and subsequently the water pressure in the earth dam increases. In areas of low compressive stress in the ground, the water pressure becomes higher than the principal stress. At the same time, seepage in the dam penetrates into the existing cracks (even invisible cracks) formed earlier and then causes stress concentration at the crack tips. When this occurs, the stress conditions in the dam change and the cracks open or develop. The explanation states that

since the tensile strength of the soil is very low or non-existent, the cracks propagate easily, resulting in a loss of dam safety.

The researchers then developed criteria for predicting and assessing the risk of hydraulic fracture in a dam. A hydraulic rupture occurs when it satisfies the following condition [5, 6, 9]:

$$\sigma_3 < W, \quad (1)$$

where σ_3 is the minimum principal stress in the earth dam, which can be determined by monitoring at the dam site (i.e. by experience) or by numerical modelling; W is the water pressure at the point of the dam under consideration, which is defined as:

$$W = \gamma_w \cdot h_w,$$

where γ_w is the specific gravity of water; h_w is the vertical depth from the depression line of the earth dam to the point under consideration.

As the depression curve extends from upstream to downstream, the value of water pressure in the horizontal sections of the dam decreases from upstream to downstream. It follows that the masses of the dam's soil located closer to the upstream face are the most susceptible to the process of hydraulic fracturing.

Proposed criteria for hydraulic fracture in a groundwater dam

B. Lofquist (1957) was probably the first to predict the resultant forces in a soil dam with an impermeable core leading to the risk of horizontal cracking [10]. He gave examples of two dams in which the measured vertical pressure in the cores was half of the pressure in the soil layers of the dam body. This stress reduction due to non-uniform settlement in different elements of the dam can be called the resultant forces of deformation processes. Let us write down this statement as follows:

$$\sigma_s = 2\sigma_c,$$

where σ_s — is the stress of the dam soil; σ_c — stress of the dam core.

After the destruction of the Hyttejuvet dam (1965) I. Torblaa and B. Kjoernsli (1968) postulated the mechanism of HF of earthen dams [11]. The researchers assumed that at the beginning of filling, compressive stresses exist throughout the core and hence there are no open cracks. However, during filling, horizontal cracks may unexpectedly form as a result of HF at locations where the total vertical stress in the core is much lower than the shell pressure due to the resultant force between the core and the less compressible shell. During water filling, the pressure acting at the upper boundary of the core may exceed the total stress acting in some plane through the core, as shown in Fig. 1.

J.L. Sherard (1973) pointed out that, under certain conditions, the pressure acting on the top of a dam can cause the opening of existing closed cracks or create new cracks [12, 13]. The author suggested that HF in the core can occur whenever the total principal stresses at a cer-

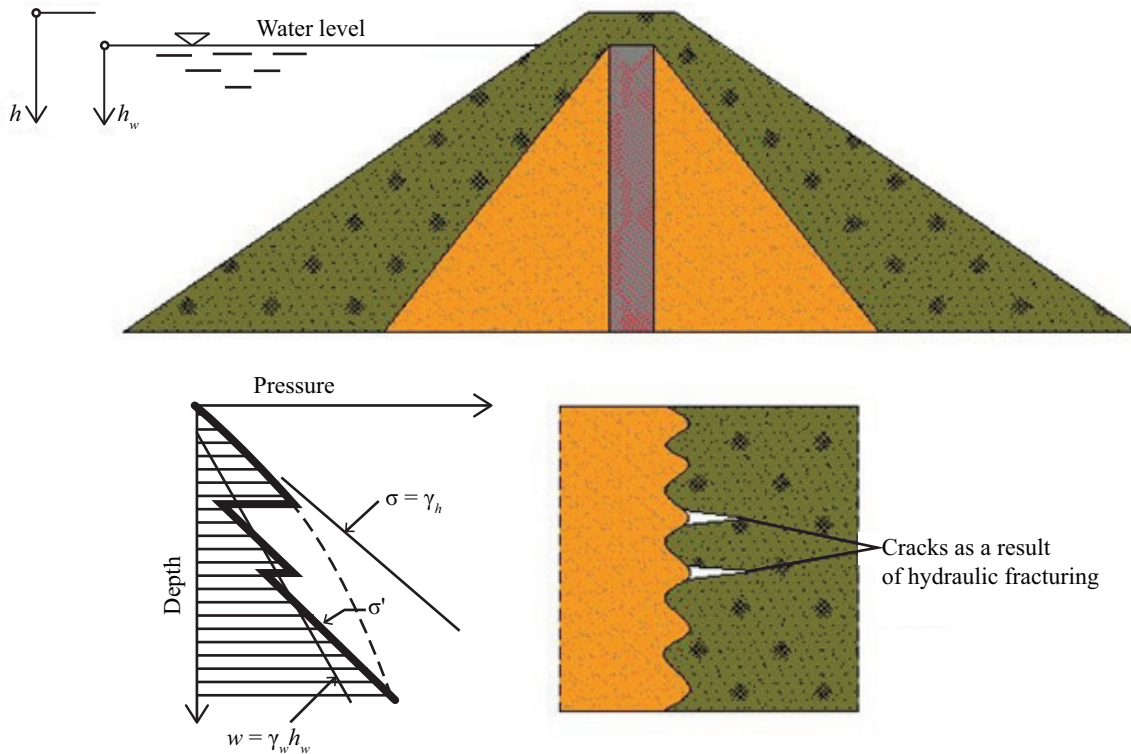


Fig. 1. Crack development in the core: σ — dam soil stress; σ' — soil stress in the zone adjacent to the core; w — water pressure

tain elevation in the core are sufficiently low compared to the water pressure at the same elevation. The internal stresses required for HF may occur when the reservoirs are first filled or may develop later as a result of continued uneven settlement of the dam body material.

Several researchers have suggested “saturated settlement” as another mechanism of core fractures during hydraulic fracturing [14, 15]. Saturated settlement develops during reservoir filling when poorly compacted soil or preexisting zones and layers of loose material become saturated and compacted under their own weight before the dry or denser soil above them has time to saturate. Thus, a break or crack forms at the location of the depression curve, and any subsequent rise in the water table allows water to penetrate this crack, resulting in erosion.

On the question of the role of cracks in the initiation of hydraulic fractures in earth dams, many studies have concluded the importance of pre-formed cracks [6, 11]. It can be said that the initiation of HF in earth dams is determined by two important conditions. The first one is the conditions under which the stress in some localized zones of the earth dams decreases, promoting the development of hydraulic fracture. The second — is the presence of cracks in the dams, which play the role of initial cracks of HF.

RESEARCH RESULTS

Relationship between hydraulic fracture and the phenomena of non-uniform settlement and resultant force

HF is considered to be closely related to the phenomena of uneven settlement and resultant force [16].

In earth dams, non-uniform settlement often occurs in areas between the embankment and the dam abutments, the embankment and concrete structures such as culverts and spillways, impermeable cores and their shoulders, and impervious trenches and abutment foundations [6]. In these zones, since the materials have different elastic moduli, the materials will settle differently and the stress in the zones may decrease to zero or even stretch. The stress reduction due to non-uniform settlement in some localized zones is called the emergent force phenomenon. Under this condition, the relationship in equation (1) is fulfilled. At the same time, due to the stress reduction in such zones due to the resultant force, some cracks may be formed. It can be said that the stress reduction along with the formation of cracks creates conditions that favour the initiation of hydraulic fracture when the dam reservoir is filled, even at the first filling.

Uneven settlement and resultant force near the dam mouths

A. Casagrande (1951) used finite element analysis to demonstrate the effect of slope of the foundations and foundation deformation on low-stress and cracked areas in an earthen dam [17]. Fig. 2 shows the conditions under which cracks occur near the steep slope of a rigid rock foundation due to non-uniform settlement and resultant force. In some recent studies K. Hoeg, H. Bui, K. He et al. also come to this conclusion [18–20].

Uneven settlement and resulting force near the culvert

Fig. 2 shows that due to the effect of non-uniform settlement, low stress areas and cracks appear near the culvert. This phenomenon has been confirmed by

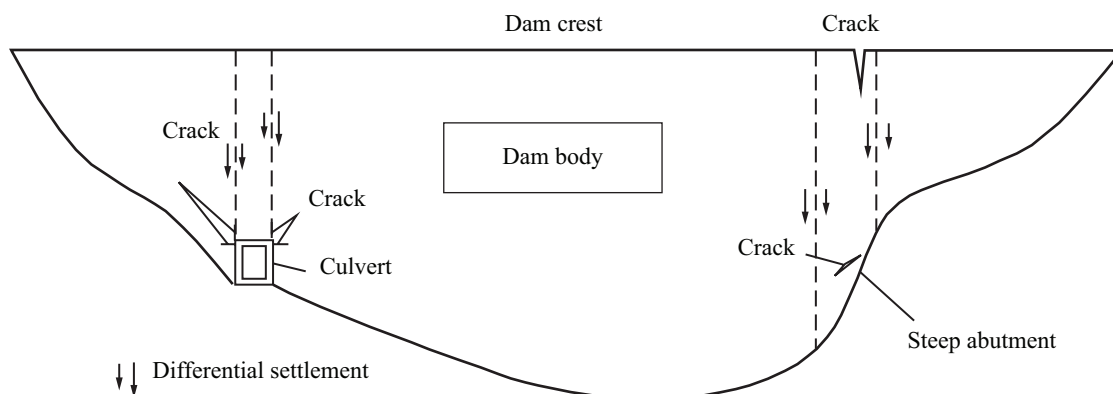


Fig. 2. Longitudinal section of the dam — formation of low stress zones and cracks in the vicinity of the conduit and bund in the embankment dam

many researchers using both theoretical and experimental methods [5, 6, 21]. Cracks formed along the culvert create concentrated filtration, which leads to dam failure.

In addition, J.L. Sherard also suggested that it is difficult to perfectly compact the soil so that there are no gaps or discontinuities at the interface between the soil and the materials of culverts or dam foundations, for example, when the culvert has an inappropriate shape (e.g., pipe shape) [13]. Therefore, there may be some gaps or discontinuities that play the role of initiating cracks for the occurrence of HF. Consequently, the risk of HF is higher than in the case of embankment dams with suitably shaped culverts.

Uneven settlement and resultant force in an earthen core dam

Fig. 3 shows the mechanism of crack formation in impermeable cores and trenches due to the effects of non-uniform settlement and resultant force between cores, trenches and soil adjacent to them. Due to the effects of non-uniform settlement and resultant force, cracks are easily formed and propagate due to HF through the cores and trenches. This mechanism

is believed to be associated with the failures of many earthen rock fill dams, especially historic dams designed with very narrow impermeable cores and narrow cut-off trenches built to reduce pore water pressure during construction, e.g. Dale Dyke (England), Hyttejuvet (Norway), Balderhead (England).

Uneven settlement and resulting force due to other causes

Some low-stress zones and cracks also occur in embankment dams due to uneven settlement resulting from the existence of a highly compressible layer in the dam foundation [22]. However, the risk of such cracks can be significantly reduced if thorough geological investigations are carried out prior to construction. In addition, embankment shrinkage, inadequate compaction, and earthquakes may be other factors associated with the formation of cracks anywhere in dams.

Dam failure and accidents under the hydraulic fracture mechanism

Studies based on statistics show that internal erosion or suffusion caused by concentrated seepage is one of the main causes of earth dam failure or accidents

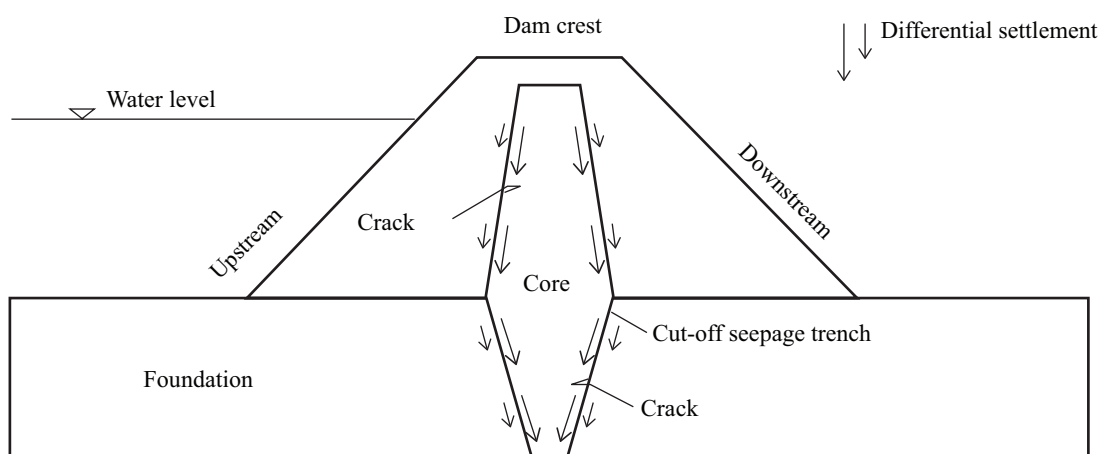


Fig. 3. Cross section of the dam — formation of low stress zones and cracks in the core dam

[23–25]. Hydraulic fracture is considered the most likely mechanism causing suffusion [5]. The Table presents a statistical database of some dam failures in the world related to hydraulic fracture. To explain this, Ngambi relied on the theory of fracture mechanics and laboratory test results to suggest that the hydraulic fracture resistance of disturbed soil specimens (corresponding to the embankment resistance of HF dams soon after their construction was completed) was very low and much less than that of undisturbed soil specimens. Thus, it can be seen that dams in the early stages after construction

are more susceptible to HF than dams that have been in operation for a long time.

Analyzing information on incidents involving earth dams constructed in different years, it can be concluded that the majority of failures have occurred at locations where the fracturing processes described above could occur. It is in the areas associated with the transition zones in the impervious core in concrete pipe spillway structures that fracturing can occur in the dam material in contact with the marked dam elements for the reasons stated above.

Statistics on dam failures

Dam (country)	Year of construction completion	Year of incident or destruction	Fracture site on the dam body	Reference
Balderhead (UK)	1964	1967	In the core area	Vaughan, 1971
Winscar (UK)	1975	1976–1980	In the area of the culvert and standpipe	Routh, 1988
Horndoyne (UK)	1990	1990	In the area of the culvert	Charles, 2005
Greenbooth (UK)	1962	1983	In the area of stability	Flemming and Rossington, 1985
Carno Lower (UK)	1911	2005	In the area of the culvert	Rowland and Powell, 2006
Leader Middle Clear Boggy Creek Site 15 (USA)	1965	1966, 1968	In the area of the impervious trench	Sherard, 1972
Upper Red Rock Creek Site 42 (USA)	1966	1967	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Caney Coon Creek Site 2 (USA)	1964	1964	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Upper Red Rock Creek Site 48 (USA)	1964	1964	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Upper Clear Boggy Creek Site 53 (USA)	1963	1964	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Little Wewoka Creek Site 17 (USA)	1960	1960	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Owl Creek Site 13 (USA)	1957	1957	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Owl Creek Site 7 (USA)	1957	1957	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Leader Middle Clear Boggy Creek Site 29 (USA)	1962	1970	In the area of the culvert	Sherard, 1972
Hyttejuvet (Norway)	1965	1966	In the core area	Torblaa and Kjoernsli, 1968
Teton (USA)	1975	1976	In the area of the impervious trench	An independent commission will examine the cause of the Teton Dam breach, 1976
Viddalsvatn (Norway)	1972	1973	In the core area	Vestad, 1976
Yard's Creek Upper Reservoir (USA)	1965	1965	In the core area	Sherard, 1973
KE 2/20 REC (Vietnam)	2008	2009	In the area of the culvert and standpipe	Nguyen and Ho, 2009

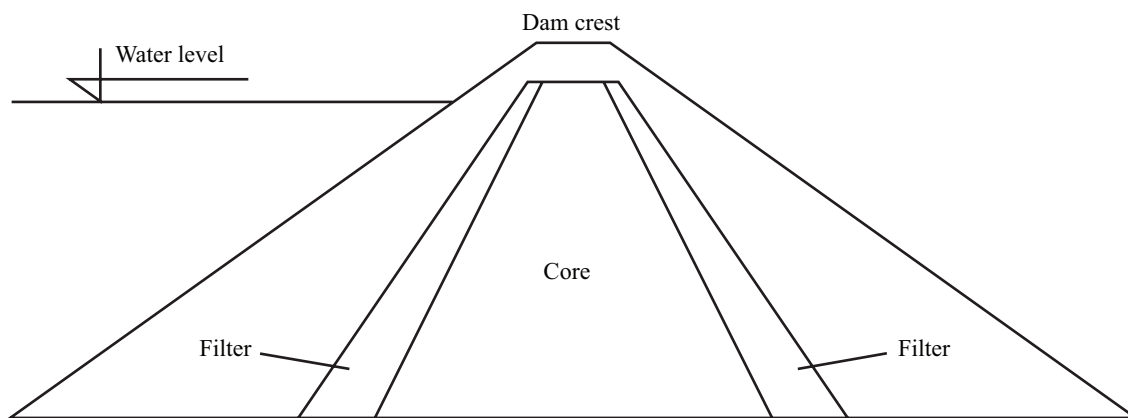


Fig. 4. Measures to reduce the risk of hydraulic fracture in a core dam

Measures to minimise the risks of hydraulic fracture

It is obvious that hydraulic fracturing is dangerous and threatens the safety of the dam. It is therefore important to implement methods to prevent dam collapse due to hydraulic fracturing.

J.L. Sherard (1992) suggested that a well-designed filter (Fig. 4) is of primary importance and other measures to reduce non-uniform fracture precipitation are of secondary importance [26]. A suitable filter is one that can safely control concentrated seepage not only due to the erosion mechanism but also due to GR. A study by S. Ngambi (1998), based on laboratory test results, also confirmed the importance of filter in preventing HF [27]. Nowadays, a suitable filter is considered a requirement among the design and construction standards for earth dams in many countries.

In order to reduce the probability of uneven settlement in the dam and to reduce the risk of GD, a study by J.L. Sherard (1992) recommended some measures. Sherard (1992) recommended some measures.

1. For hydraulic fracturing occurring near the dam mouths, J.L. Sherard suggested excavating the dam mouths to make the slopes more gentle and to eliminate abrupt changes or irregularities in the dam mouths

or bases (Fig. 5). The purpose of this measure is to reduce the risk of vaulting near the dam mouths, which leads to cracks and tensile zones in the dam.

2. To prevent HF near culverts, J.L. Sherard advised that other culvert shapes should be used in practice. The recommended culvert shapes should have slightly sloping outer surfaces. In particular, J.L. Sherard (1992) and S. Ngambi (1997) suggested culverts with sloping outer slopes in the ratio of one in the horizontal direction to eight or ten in the vertical direction (i.e. slope of the outer sloping walls from 0.1 to 0.125) [9, 26].

Currently, among the many standards for the design and construction of buried culverts in embankment dams used in developed countries (Japan and the USA), it is also recommended that buried culverts have exterior sloping walls with a slope of 0.1 to 0.3 (Fig. 6). In recent studies, D.Q. Tran (2018) proposed a critical slope of sloped walls of at least 0.4 [28]. Many researchers have concluded that culvert reshaping is a common and effective measure to prevent the risk of HF near culverts [6, 26, 29], because reshaping not only effectively reduces the resultant force, but also helps to compact the bulk soil on the outer surfaces of culverts.

CONCLUSION

Based on some of the studies on hydraulic fracturing mentioned above, the following conclusions can be drawn.

Hydraulic fracture is a real potential hazard for earth dams, especially at first filling. The material behaviour of earth dams, mainly at the transition zones and at the interface with other elements, suggests processes related to hydraulic fracture occurring under the water pressure of the seepage flow. Inappropriate culvert shape, sloping foundations, and too narrow impermeable trenches all increase the likelihood of dam hydraulic fracturing. The mechanism of the processes associated with hydraulic fracture in the dam body is not fully understood, but it is already clear that the design of new earth retaining structures must take

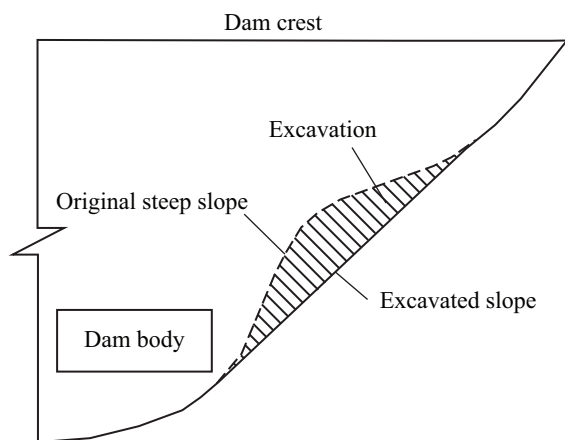


Fig. 5. Mitigation measure to reduce the risk of hydraulic fracture near dam embankments

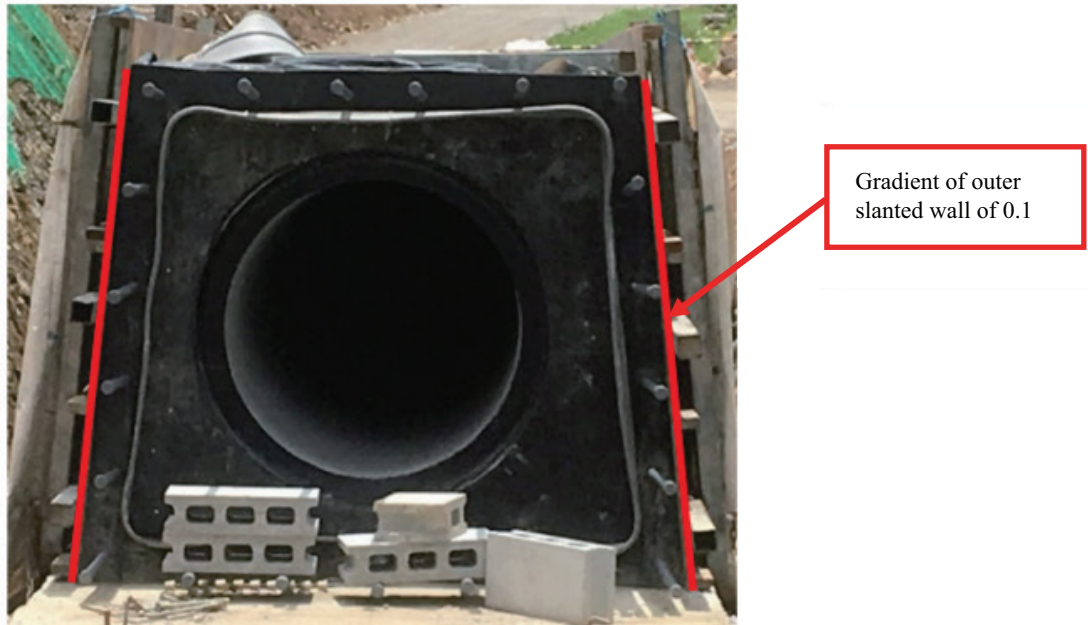


Fig. 6. Current general shape of a groundwater dam culvert in Japan with sloping outer walls with a slope of 0.1

into account the above factors, which are related to the safety of the structure and its long-term failure-free operation.

Although a large number of studies have focused on measures to safely control the risk of dam failures

due to hydraulic fracture and certain measures have been recommended, the effectiveness of some measures is poorly demonstrated or not fully agreed upon. Therefore, measures to improve the safety of dams against hydraulic fracture need to be examined more closely.

REFERENCES

1. Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F. Estimating the Impact of Global Change on Flood and Drought Risks in Europe: A Continental, Integrated Analysis. *Climatic Change*. 2006; 75(3):273-299. DOI: 10.1007/s10584-006-6338-4
2. Salyamova K.D., Akhmedov M.A. Statistical analysis of damage and destruction of soil dams. *Innovative ways to solve current problems of nature management and environmental protection : collection of reports of the International Scientific and Technical Conference*. 2018; 104-113. EDN YNUXAD. (rus.).
3. Gelfer A.A. *Causes and forms of destruction of hydraulic structures*. Leningrad; Moscow, Onti, 1936; 320. (rus.).
4. Valeria O.G. Study the risks of dam failure. *Alley of Science*. 2019; 1(9):(36):102-105. EDN JBHDPR. (rus.).
5. Sherard J.L. Hydraulic fracturing in embankment dams. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1986; 112(10):905-927. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:10(905)
6. 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
7. Mhach H.K. *An experimental study of hydraulic fracture and erosion : doctoral thesis*. City University London, 1999.
8. Mannanov I.I., Garipova L.I. The influence of filtration reservoir characteristics for additional oil production at acid fracturing. *Territorija Neftegaz*. 2015; 12:124-127. EDN VOLPFD. (rus.).
9. 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
10. Lofquist B. Discussion on Cracking in Earth Dams. *Proceedings of the 4th international conference of soil mechanics and foundation engineering*. London UK, 1957; 261-262.
11. Torblaa I., Kjoernsli B. *Leakage through horizontal cracks in the core of Hyttejuvet Dam*. Norwegian Geotechnical Institute, 1968; 80:39-47.
12. Vaughan P.R. Cracking of Embankment Dam Cores and the Design of Filters for their Protection. *Lecture given in Madrid and published in the Bulletin of Sociedad Espanola de Mecanica del Suelo Y Cimentaciones*. 1976.
13. Sherard J.L. Embankment Dam Cracking. *Hirschfeld, R.C. and Poulos, S.J., Eds., Embankment-*

Dam Engineering (Casagrande Volume). John Wiley, New York, 1973; 324-328.

14. Leonards G.A., Davidson L.W. Reconsideration of Failure Initiating Mechanisms for Teton Dam. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 1984; 31.

15. Mesri G., Ali.S. Discussion of “Hydraulic Fracturing in Embankment Dams” by James L. Sherard (October, 1986, Vol. 112, No. 10). *Journal of Geotechnical Engineering*. 1988; 114(6):742-746. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1988)114:6(742)

16. Zhu J., Ji E., Wen Y., Zhang H. Elastic-plastic solution and experimental study on critical water pressure inducing hydraulic fracturing in soil. *Journal of Central South University*. 2015; 22(11):4347-4354. DOI: 10.1007/s11771-015-2983-y

17. Casagrande A. *Notes on the design of earth dams*. Harvard University, Department of Engineering, 1951.

18. He K., Fell R., Song C. Transverse cracking in embankment dams resulting from cross-valley differential settlements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022; 26(3):995-1021. DOI: 10.1080/19648189.2019.1691663

19. Bui H., Fell R., Song C. *Two and three dimensional numerical modeling of the potential for cracking of embankment dams during construction*. Sydney, Australia, 2004; 123.

20. He K., Song C., Fell R. *Assessing potential cracking zones in embankment dams*. Southern Cross University, Lismore, NSW, 2014; 721-726.

21. Kobayashi N., Mochida J., Sumida Y., Yoshitake Y. Evaluation of arching action generated in

the backfill between outlet conduit and existing embankment. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*. 2012; 80: 223-230.

22. Narita K. *Design and construction of embankment dams*. Department of Civil Engineering, Aichi Institute of Technology, 2000.

23. 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

24. Stematiu D. *Dam safety management*. Bucureresti Conspress, 2009.

25. Charles J.A. *Delivering benefits through evidence: lessons from historical dam incidents*. Project. Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol, 2011.

26. Sherard J.L. Trends and debatable aspects in embankment dam engineering. *Embankment Dams, ASCE*. 1992; 416-422.

27. 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.

28. 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

29. Tran D.Q. Research on cause of dam failure from viewpoint of hydraulic fracturing — case study of a dam failure in Vietnam. *International Journal of GEOMATE*. 2018; 14(41). DOI: 10.21660/2018.41.57454

Received September 28, 2023.

Adopted in revised form on November 27, 2023.

Approved for publication on December 29, 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 — idea of the article, scientific supervision, formulation of the research concept and scientific editing of the text.

Tran Manh Cuong — collecting material, processing material, writing an article.

The authors declare no conflict of interest.