УДК 627.43

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ДИАФРАГМЫ, ВЫПОЛНЕННОЙ В ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЕ МЕТОДОМ «СТЕНА В ГРУНТЕ», НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ

М.П. Саинов, Г.М. Кудрявцев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Аннотация. В конструкции гидротехнических сооружений используются противофильтрационные элементы, для возведения которых часто применяют способ «стена в грунте». Предыдущие исследования показали, что надежная работы стены-диафрагмы во многом зависит от свойств материала, из которого она выполнена. В статье рассмотрены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины высотой 39 м с противофильтрационным элементом в виде диафрагмы, выполненной методом «стена в грунте». В исследовании варьировались свойства материала стены. В ходе работ было выявлено, что опасность для диафрагмы представляют растягивающие напряжения, возникающие от деформаций изгиба при восприятии стеной гидростатического давления. Эти напряжения являются проблемой для конструкций противофильтрационных диафрагм—«стен в грунте» в грунтовых плотинах из жестких материалов. Чем жестче материал, тем выше опасность проявления растягивающих напряжений. При использовании материала с модулем деформации менее 1000 МПа растягивающие напряжения не проявляются, так как компенсируются сжатием под действием собственного веса стены. Если использовать в качестве материала стены железобетон, то возникающие растягивающие напряжения превысят прочность железобетона на растяжение и не смогут быть восприняты даже арматурой. Рекомендуется использовать глиноцементобетон с модулем деформации не выше 1000 МПа.

Ключевые слова: грунтовая плотина, метод «стена в грунте», буросекущиеся сваи, глиноцементобетон, напряженно-деформированное состояние, модуль деформации

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.214-221

IMPACT OF DEFORMABILITY OF MATERIAL OF SEEPAGE-CONTROL DIAPHRAGM INSTALLED IN EARTHFILL DAM USING THE SLURRY WALL METHOD METHOD ON STRENGTH OF THE MATERIAL

M.P. Sainov, G.M. Kudryavtsev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavlshoshe, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract. In design of hydraulic structures seepage-control components are used; for installation thereof the cut-off wall method is often applied. Previous studies demonstrated that the reliable operation of the wall (diaphragm) depends much on properties of the material of which it is made. The article considers the results of calculations of stress-strain state of the earth dam 39 m of height, with the seepage-control component in a form of a diaphragm installed using the cut-off wall method. During the research the properties of the wall material varied. It was revealed in the course of works that tensile stresses resulting from bending strains when the wall takes on the hydrostatic pressure are of serious hazard to the diaphragm. Such stresses are problematic for designs of seepage-control diaphragms (cut-off walls) in earth dams made of stiff materials. The more stiff the material the higher the risk of showing of tensile stresses. When using the material with the deformation modulus less than 1000 MPa the tensile stresses do not show because they are compensated by compression under action of the wall's own weight. If a reinforced concrete is used as the wall material, the appearing tensile stresses will exceed the tensile strength of the reinforced concrete and will not be able to be taken even by reinforcing bars. It is recommended to use clay cement concrete with the deformation modulus not higher than 1000 MPa.

It was concluded that a non-ground diaphragm installed in the earth dam body using the cut-off wall method can be a reliable seepage-control component because it is installed after the dam construction completion and does not exercise significant deformations from ground fill settlements. A stress-strain state of the thin-walled non-ground diaphragm in the earth dam body is determined by deformations of the fill containing it. Intrinsic wall stiffness influences weakly on the stress-strain state of the earth dam.

Key words: earth dam, slurry wall method, secant bored piles, clay cement concrete, stress-strain state, deformation modulus

В гидротехническом строительстве конструкции типа «стена в грунте» обычно используются в качестве противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений. Примерами могут служить плотины «Керхе» в Иране [1], «Мерове» в Судане [2], «Сильвенштейн» в Германии [3], на Юмагузинской ГЭС в России [4]. Считается, что впервые методом «стена в грунте» противофильтрационная завеса была устроена из буросекущихся свай в 1950-х гг. [5]. Однако на самом деле первая завеса из буросекущихся свай была устроена в США еще в 1940–1944 гг. в основании плотины «Хэйлис» (США) для борьбы с фильтрацией в закарстованных известняках [6, 7].

Впоследствии метод буросекущихся свай стали использовать для ремонта грунтовых плотин путем создания в них нового противофильтрационного элемента. Примером может служить плотина «Балдерхид» (Соединенное Королевство) [8, 9]. В России буросекущиеся сваи были применены в 1998–2002 гг. для ремонта грунтовой плотины Курейской ГЭС [10–12].

Успешная работа диафрагм, созданных методом «стена в грунте», как противофильтрационных элементов грунтовых плотин, привела к тому, что на ряде плотин подобным способом стали устраивать противофильтрационные диафрагмы во вновь создаваемых плотинах [13–15]. Недавно специалисты предложили устроить методом буросекущихся свай многоярусную диафрагму в высокой плотине [16, 17]. Вопрос об использовании метода «стена в грунте» для создания противофильтрационных диафрагм в теле новых плотин в настоящее время является актуальным.

В 2016 г. запланировано построить каменно-земляную плотину Нижне-Бурейской ГЭС, в которой противофильтрационная диафрагма будет устроена из буросекущихся свай [18].

Наши предыдущие исследования показали, что надежная работы стены-диафрагмы во многом зависит от свойств материала, из которого она выполнена [19].

При проектировании противофильтрационной стены обычно считают, что ее материал по деформируемости должен быть приближен к вмещающим грунтам. В [20] нами была под-

тверждена правильность данного принципа для случая, когда противофильтрационная стена выполняется в основании плотины. В этом случае стена испытывает значительное сжатие от осадок окружающего грунта, что может нарушить прочность ее материала на сжатие. Чтобы избежать концентрации сжимающих напряжений стену выполняют не из обычного бетона, а из глиноцементобетона. Глиноцементобетон — более деформируемый и менее прочный материал, но боковое обжатие стены окружающим грунтом позволяет обеспечить его прочность на сжатие.

В связи с этим становится актуальным вопрос о выборе материала для такого противофильтрационного элемента. При ремонте грунтовой плотины Курейской ГЭС специальным проектно-изыскательским институтом «Гидроспецпроект» были разработаны составы глиноцементобетона, которые при низком модуле упругости (100...200 МПа) обеспечивали довольно высокую прочность (1...2 МПа) [10]. А.В. Радзинским были проведены экспериментальные исследования свойств глиноцементобетона [21, 22], которые позволили установить связь между его составом и деформативными и прочностными свойствами.

Представленные в статье исследования посвящены вопросу выбора материала для другого случая: когда стена является противофильтрационным элементом в теле самой грунтовой плотины. В такой ситуации стена не испытывает сжатия от осадок плотины, так как возводится после завершения отсыпки, а воспринимает только гидростатическое давление.

Исследования проводились на примере конструкции, соответствующей условиям строительства Нижне-Бурейской ГЭС. В расчетном сечении плотина имеет высоту 39 м и располагается на скальном основании. Стена глубиной 36,5 м и толщиной 1,2 м прорезает песчано-гравийное ядро плотины, углубляясь в скальное основание.

Исследования проводились путем численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Модель плотины насчитывает 542 конечных элемента (рис. 1). Контакт между негрунтовыми материалами (глиноцементобе-

Рис. 1. Сетка МКЭ: 1 — упорные призмы из горной массы; 2 — песчано-гравийное ядро; 3 — гравийно-песчаный грунт; 4 — противофильтрационная стена; 5 — каменный банкет; 6 — скала

Fig. 1. Finite Elements Method Grid: 1 — toes consisting of rock mass; 2 — gravel island; 3 — gravel-sand ground; 4 — seepage-control wall; 5 — stone bank; 6 — rock

тон, скала) с грунтами, а также между собой моделировался с помощью контактных конечных элементов. Использовались конечные элементы с квадратичной или с кубической аппроксимацией перемещений внутри элемента. При квадратичной аппроксимации количество степеней свободы конструкции составляет 2996, при кубической — 5002.

Рассматривались следующие варианты свойств материала стены (E — модуль линейной деформации, ν — коэффициент Пуассона, ρ — плотность материала):

- вариант 1: $E = 100$ МПа, $\nu = 0,30$, $\rho = 1,93$ т/м³;
- вариант 2: $E = 1000$ МПа, $\nu = 0,25$, $\rho = 2,10$ т/м³;
- вариант 3: $E = 10\,000$ МПа, $\nu = 0,20$, $\rho = 2,18$ т/м³;
- вариант 4: $E = 29\,000$ МПа, $\nu = 0,18$, $\rho = 2,4$ т/м³ (железобетон).

В реальных условиях Нижне-Бурейской ГЭС противофильтрационная стена будет выполняться из глиноцементобетона со свойствами, близкими к варианту 1 ($E = 76$ МПа, $\nu = 0,30$).

Расчеты проводились с помощью вычислительной программы Nds_N, разработанной М.П. Саиновым [23]. Это позволило учесть подробную схему возведения сооружения, а также нелинейный характер деформирования грунтов и контактов материалов, в частности различие деформируемости камня при активном нагружении и разгрузке. Нелинейность деформирования грунтов воспроизводится на основе модели, предложенной Л.Н. Рассказовым [24]. Для гравийно-галечникового грунта тела плотины приняты свойства, примерно соответствующие линейному деформированию при $E = 50$ МПа.

Расчеты велись с учетом последовательности возведения и загрузки конструкции. Сначала моделировалось возведение тела плотины, затем — устройство диафрагмы методом «стена

в грунте» и формирование гребня, а потом наполнение водохранилища и передача на диафрагму гидростатической нагрузки. Воспроизводились и особенности технологии возведения стены. На начальном этапе, когда материал стены должен воспринять собственный вес, он принимался как еще не затвердевший. Его модуль деформации назначался равным 1/5 от окончательного, а коэффициент Пуассона — равным 0,45. При этом учитывалась возможность проскальзывания полужидкого материала относительно вмещающего грунта, в контактных элементах касательная жесткость была принята близкой к нулю. В последующих расчетах, когда предполагалась передача иных нагрузок на стену, материал стены считался полностью затвердевшим.

Расчеты показали, что под действием гидростатического давления стена смещается в сторону нижнего бьефа и прогибается (рис. 2, а — 5, а). Ее максимальное горизонтальное смещение наблюдается примерно посередине высоты плотины. На гребне оно примерно на треть меньше, а в месте закрепления в скальном основании — близко к нулю. Величина смещений зависит от жесткости материала, из которого выполняется стена, но не значительно (табл. 1). Наибольшие смещения и прогиб характерны для варианта 1, в котором материал стены наиболее деформируем, а наименьшие — для варианта 4. Различие между прогибами составляет 3 %.

Табл. 1. Смещения и прогибы стены, см
Table 1. Offsets and sags of the wall, cm

Вариант / Variant	Смещения / Offsets			Прогиб / Sag
	наверху / At the top	максимум / Maximum	внизу / At the bottom	
1	2,6	4,4	0,2	4,2
2	2,7	4,2	0,2	4,0
3	2,7	4,0	0,2	3,8
4	2,8	3,8	0,2	3,6

Изгибные деформации стены имеют знакопеременный характер. На основном, среднем по высоте, участке стена изгибается в сторону нижнего бьефа. Верхняя же часть стены имеет слабый изгиб в сторону верхнего бьефа. Сильный изгиб в сторону верхнего бьефа стена получает также в зоне заделки в скальное основание.

Изгибные деформации и собственный вес стены являются основными факторами, определяющими ее напряженно-деформированное состояние (НДС).

Кроме того, НДС формируется сжатием за счет осадок грунта плотины при досыпке грунтовой «шапки» плотины. Полученные результаты показали, что стена по-разному взаимодействует с грунтом тела плотины с верховой и низовой сторон. До начала наполнения с обеих сторон контакт стены с грунтом сохраняет свою прочность, и через трение на стену передаются усилия от осадок тела плотины. В процессе восприятия гидростатического давления низовая упорная призма сжимается при напряжениях σ_x , а верховая — испытывает разуплотнение. Поэтому контакт между стеной и верховой упорной призмой нарушается, теряет свою сдвиговую прочность. Происходит проскальзывание грунта относительно стены, благодаря чему передача вертикальных нагрузок на верховую грань стены становится невозможна. При наполнении водохранилища уровень сжимающих напряжений в стене несколько уменьшается.

В горизонтальном направлении стена обжата гидростатическим давлением и боковым давлением грунта. Горизонтальные нормальные напряжения σ_x в стене плавно увеличиваются по глубине, немного превышая гидростатическое давление.

Распределение в стене вертикальных напряжений σ_y за счет действия собственного веса также имеет тенденцию к росту сжатия с глубиной. Наверху стены напряжения σ_y не равны 0 за счет действия веса «шапки» плотины. Однако вследствие изгиба напряжения σ_y распределены между верховой и низовой гранями стены нерав-

номерно (см. рис. 2, б–в – 5, б–в). Из-за изгиба на одной из граней происходит увеличение напряжений σ_y , а на другой — снижение. В варианте 1 разница между напряжениями на гранях практически не заметна (см. рис. 2). Соответственно при $E \leq 100$ МПа изгибные деформации не оказывают особого влияния на напряжения σ_y , они формируются в основном под действием собственного веса стены. С увеличением модуля деформации моментная составляющая распределения напряжений увеличивается и образуются зоны растягивающих напряжений σ_y . В варианте 2 зона растяжения образуется в узле заделки стены в скальное основание (см. рис. 3). В вариантах 3 и 4 моментная составляющая в распределении напряжений становится столь значительна, что зона растяжения образуется не только в заделке, но и практически по всей высоте стены (см. рис. 4, 5). На участке стены в теле плотины низовая грань стены — растянута, верховая — сжата. Максимальные значения растягивающих напряжений σ_y наблюдаются примерно на 40 % от высоты стены.

Неблагоприятное напряженное состояние имеет стена в области заделки в скальное основание. В силу разной жесткости скалы и тела плотины, в этом месте стена испытывает сильный изгиб. Кроме того, из-за смещений тела плотины в заделке стены возникают растягивающие продольные усилия. Вследствие этого в вариантах 2, 3 и 4 на верховой грани напряжения σ_y — растягивающие. Поскольку напряжения явно превосходят прочность материала на растяжение, то можно ожидать нарушения целостности узла сопряжения стены с основанием.

По экстремальным значениям напряжений σ_y в стене, указанным в табл. 2, построены графики (см. рис. 5), которые позволяют оценить прочностное состояние стены для разных значений модулей деформации E материала. Очевидно, что во всех вариантах прочность на сжатие обеспечивается с запасом. Большую опасность представляют собой растягивающие напряжения. При $E < 1000$ МПа опасности трещинообра-

Табл. 2. Вертикальные напряжения, МПа, в стене
Table 2. Vertical intensities (stresses), MPa, in the wall

Варианты / Variants	В теле плотины / In the dam body		В заделке / In the filling	
	минимум / Minimum	максимум / Maximum	минимум / Minimum	максимум / Maximum
1	–0,76	–0,73	–0,29	–0,21
2	–0,85	–0,53	–1,4	0,25
3	–2,2	1,3	–2,8	2,0
4	–4,9	3,9	–2,8	2,1

зования в стене нет, но узел заделки может быть признан надежным только при $E < 200$ МПа.

Таким образом, для обеспечения надежной работы стены действительно необходимо стремиться к снижению модуля деформации его материала до 100 МПа. Проектное решение о выборе для стены глиноцементобетона с $E = 76$ МПа следует признать правильным.

Рис. 2. НДС противofilьтрационной стены при $E = 100$ МПа (вариант 1): *a* — смещения, см; *б* — напряжения σ_y на верховой грани, МПа; *в* — напряжения σ_y на низовой грани, МПа

Fig. 2. Stress-strain state of the seepage-control wall at $E = 100$ МПа (variant 1): *a* — offsets, cm; *б* — stresses σ_y at the upstream face, МПа; *в* — stresses σ_y at the downstream face, МПа

Рис. 3. НДС противofilьтрационной стены при $E = 1000$ МПа (вариант 2). Обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. Stress-strain state of the seepage-control wall at $E = 1000$ МПа (variant 2) Keys see in Fig. 2

Рис. 4. НДС противofilьтрационной стены при $E = 10\,000$ МПа (вариант 3). Обозначения см. на рис. 2

Fig. 4. Stress-strain state of the seepage-control wall at $E = 10\,000$ МПа (variant 3). Keys see in Fig. 2

Рис. 5. НДС противofilьтрационной стены при $E = 29\,000$ МПа (вариант 4). Обозначения см. на рис. 2

Fig. 5. Stress-strain state of the seepage-control wall at $E = 29\,000$ МПа (variant 4). Keys see in Fig. 2

Рис. 6. Изменение экстремальных значений напряжений в стене при росте значений модуля линейной деформации E

Fig. 6. Variation of extreme values of stresses in the wall at increase of values of the linear deformation modulus E

Выводы:

Негрунтовая диафрагма, устроенная в теле грунтовой плотины методом «стена в грунте» может быть надежным противofilьтрационным элементом, поскольку она возводится после завершения строительства плотины и не испытывает значительных деформаций от осадок грунтовой насыпи.

НДС тонкостенной негрунтовой диафрагмы в теле грунтовой плотины определяется деформациями вмещающей ее насыпи. Собственная жесткость стены оказывает слабое влияние на НДС грунтовой плотины.

Проблема применения жестких материалов для устройства противofilьтрационных диафрагм-«стен в грунте» в грунтовых плотинах состоит в опасности появления растягивающих

напряжений при изгибных деформациях. Чем жестче материал, тем выше опасность проявления растягивающих напряжений. Железобетон в диафрагмах высотой 30...40 м применять не следует. Рекомендуется использовать глиноцементобетон с модулем деформации не выше 1000 МПа.

Наиболее слабым узлом конструкции диафрагмы в грунтовой плотине является ее со-

пряжение со скальным основанием. Вследствие сильного изгиба возможно образование в стене трещин, связанных с нарушением прочности материала на растяжение. По возможности следует устраивать заделку стены в заранее подготовленный массив глиноцементобетона или глины, или применять для устройства стены глиноцементобетон с низким модулем деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mirhasemi A.A., Pakzad M., Shadravan B. The world's largest cutoff wall at Karkheh dam // *Hydropower & Dams*. 2005. Issue 2. Pp. 2–6.
2. Ehrhardt T., Scheid Y., El Tayeb A. Entwurf und ausführung der steinschuttdamme und der schlitzwand des Merowe-Projektes // *WasserWirtschaft*. 2011. Vol. 101 (1–2). Pp. 36–42.
3. Noell H., Langhagen K., Popp M., Lang T. Rehabilitation of the sylvenstein earth-fill dam — Design and construction of the cut off wall // *WasserWirtschaft*. 2013. Vol. 103. Issue 5. Pp. 76–79.
4. Баранов А.Е. Из опыта проектирования и строительства Юмагузинского гидроузла на р. Белой // *Вестник МГСУ*. 2006. № 2. С. 112–122.
5. Ганичев И.А., Меццержаков А.Н., Хейфец В.Б. Новые способы устройства противofильтрационных завес // *Гидротехническое строительство*. 1961. № 2. С. 14–18.
6. Круглицкий Н.Н., Мильковский С.И., Скворцов В.Ф., Шейнблум В.М. Траншейные стенки в грунтах. Киев : Наукова Думка, 1973. 304 с.
7. Федоров Б.С., Смородинов М.И. «Стена в грунте» — прогрессивный способ строительства. М. : Стройиздат, 1975. 33 с. (Бюро внедрения)
8. Vaughan P.P., Kluth D.J. et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair // 10th ICOLD Congress. 1970. Q. 36. R. 5. Pp. 73–93.
9. Ничипорович А.А., Тейтельбаум А.И. Оценка трещинообразования в ядрах каменно-земляных плотин // *Гидротехническое строительство*. 1973. № 4. С. 10–27.
10. Малышев Л.И., Шишов И.Н., Кудрин К.П., Бардюков В.Г. Технические решения и результаты первоочередных работ по сооружению противofильтрационной стены в грунте в ядре и в основании плотины Курейской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. 2001. № 3. С. 31–36.
11. Малышев Л.И., Рассказов Л.Н., Солдатов П.В. Состояние плотины Курейской ГЭС и технические решения по ее ремонту // *Гидротехническое строительство*. 1999. № 1. С. 31–36.
12. Бардюков В.Т., Изотов В.Н., Гришин В.А., Радченко В.Г., Шишов И.Н. Ремонт плотины Курейской ГЭС // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Введенеева*. 2000. Т. 238. С. 92–96.
13. Радченко В.Г., Лопатина М.Г., Николайчук Е.В., Радченко С.В. Опыт возведения противofильтрационных устройств из грунтоцементных смесей // *Гидротехническое строительство*. 2012. № 6. С. 46–54.
14. Strobl T., Schmid R. Wadi Hawashinah dam. Oman. Ground Water recharge dam to stop salt water intrusion. Strabag. Dam engineering in Kenya, Nigeria, Oman and Turkey. Cologne, April 1997. No. 52. Pp. 67–68.
15. Lorenz W., List F. Application of the trench diaphragm method in constructing the impervious core of dams consisting in part of the low-grade fill material // 12th ICOLD. Congress, Mexico. 1976. Q. 44. R. 6. Pp. 93–104.
16. Королев В.М., Смирнов О.Е., Аргал Э.С., Радзинский А.В. Новое в создании противofильтрационного элемента в теле грунтовой плотины // *Гидротехническое строительство*. 2013. № 8. С. 2–9.
17. Пат. 130322 RU, МПК E02B 7/06, E02B 3/16. Грунтовая плотина / Н.А. Алиев, Б.У. Гаджимагомаев, В.Н. Киселев, Д.А. Никулин, В.А. Редькин, Б.Н. Юркевич ; патентообл. ОАО «Ленгидропроект». № 2013111020/13 ; заявл. 12.03.2013 ; опубл. 20.07.2013. Бюл. № 20.
18. Пат. 151898 RU, МПК E02B 7/06, E02B 3/16. Грунтовая плотина / А.С. Гаркин, В.В. Борзунов, А.В. Васильев, Е.А. Кадушкина, Е.А. Николаева ; патентообл. ОАО «Ленгидропроект». № 2014144558/13 ; заявл. 05.11.2014 ; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11.
19. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С., Саинов М.П. Бетонная диафрагма как элемент реконструкции грунтовой плотины // *Гидротехническое строительство*. 1999. № 4. С. 10–16.
20. Саинов М.П. Влияние жесткости материала противofильтрационной стены в основании грунтовой плотины на ее прочность // *Приволжский научный журнал*. 2016. № 3 (39). С. 62–69.
21. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Выбор состава глиноцементобетона при создании «стен в грунте» // *Гидротехническое строительство*. 2014. № 3. С. 16–23.
22. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Прочность и деформативность глиноцементобетона в сложном напряженном состоянии // *Гидротехническое строительство*. 2014. № 8. С. 29–33.

23. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Vol. 9. No. 4. Pp. 208–225.

24. Рассказов Л.Н., Джсха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1997. № 7. С. 31–36.

Поступила в редакцию в октябре 2016 г.

Об авторах: **Саинов Михаил Петрович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mp_sainov@mail.ru;

Кудрявцев Григорий Михайлович — ассистент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, gregik@mail.ru.

Для цитирования: Саинов М.П., Кудрявцев Г.М. Влияние деформируемости материала противофильтрационной диафрагмы, выполненной в грунтовой плотине методом «стена в грунте», на его прочность // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 2 (101). С. 214–221. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.214-221

REFERENCES

1. Mirhasemi A.A., Pakzad M., Shadravan B. The world's largest cutoff wall at Karkheh dam. Hydropower & Dams. 2005, issue 2, pp. 2–6.
2. Ehrhardt T., Scheid Y., El Tayeb A. Entwurf und ausführung der steinschuttdamme und der schlitzwand des Merowe-Projektes. WasserWirtschaft. 2011, vol. 101 (1–2), pp. 36–42.
3. Noell H., Langhagen K., Popp M., Lang T. Rehabilitation of the sylvenstein earth-fill dam — Design and construction of the cut off wall. WasserWirtschaft, 2013, vol. 103, issue 5, pp. 76–79.
4. Baranov A.E. Iz opyta proektirovaniya i stroitel'stva Yumaguzinskogo gidrouzla na r. Beloy [From the Experience of Designing and Construction of Yumaguzinskaya Hydrosystem on the Belaya River]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2006, no. 2, pp. 112–122. (In Russian)
5. Ganichev I.A., Meshcheryakov A.N., Heyfets V.B. Novye sposoby ustroystva protivofil'tratsionnykh zaves [New Seepage-Control Screen Arrangement Techniques]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. 1961, no. 2, pp. 14–18. (In Russian)
6. Kruglitskiy N.N., Mil'kovskiy S.I., Skvortsov V.F., Sheynblyum V.M. Transheyne stenki v gruntakh [Trench Walls in Soils]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1973, 304 p. (In Russian)
7. Fedorov B.S., Smorodinov M.I. «Stena v grunte» — progressivnyy sposob stroitel'stva [Trench Wall Method is a Progressive Method of Construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 33 p. (Byuro vnedreniya [Bureau of Implementation]) (In Russian)
8. Vaughan P.P., Kluth D.J. et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair. 10-th ICOLD Congress. 1970, Q. 36, R. 5, pp.73–93.
9. Nichiporovich A.A., Teytel'baum A.I. Otsenka treshchinoobrazovaniya v yadrakh kamЕННО-zemlyanykh plotin [Analysis of Crack Formation in Cores of Earth-and-Rock-Fill Dams]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. 1973, no. 4, pp. 10–27. (In Russian)
10. Malyshev L.I., Shishov I.N., Kudrin K.P., Bardyukov V.G. Tekhnicheskie resheniya i rezul'taty pervoocherednykh rabot po sooruzheniyu protivofil'tratsionnoy steny v grunte v yadre i v osnovanii plotiny Kureyskoy GES [Technical Solutions and Results of Priority Works on Construction of a Seepage-Control Slurry Wall in the Core and in the Base of the Kureiskaya HPP Dam]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. 2001, no. 3, pp. 31–36. (In Russian)
11. Malyshev L.I., Rasskazov L.N., Soldatov P.V. Sostoyaniye plotiny Kureyskoy GES i tekhnicheskie resheniya po ee remontu [Condition of the Kureiskaya HPP Dam and Technical Solutions for its Repair]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]. 1999, no. 1, pp. 31–36. (In Russian)
12. Bardyukov V.T., Izotov V.N., Grishin V.A., Radchenko V.G., Shishov I.N. Remont plotiny Kureyskoy GES [Repair of the Kureiskaya HPP Dam]. Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva [Proceedings of the VNIIG]. 2000, vol. 238, pp. 92–96. (In Russian)
13. Radchenko V.G., Lopatina M.G., Nikolaychuk E.V., Radchenko S.V. Opyt vozvedeniya protivofil'tratsionnykh ustroystv iz gruntotsementnykh smesey [Experience of Construction of Seepage-Control Installations Made of Soil-Cement Mixtures]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction — Power Technology and Engineering]. 2012, no. 6, pp. 46–54. (In Russian)
14. Strobl T., Shmid R. Wadi Hawashinah dam. Oman. Ground Water recharge dam to stop salt water intrusion. Strabag. Dam engineering in Kenya, Nigeria, Oman and Turkey. Cologne, April 1997, no. 52, pp. 67–68.
15. Lorenz W., List F. Application of the Trench Diaphragm Method in Constructing the Impervious Core of Dams Consisting in Part of the Low-Grade Fill Material. 12-th ICOLD Congress, Mexico, 1976, Q. 44, R. 6, pp. 93–104.
16. Korolev V.M., Smirnov O.E., Argal E.S., Radzinskiy A.V. Novoe v sozdaniy protivofil'tratsionnogo elementa v tele gruntovoy plotiny [Novelty of Creation of a

Seepage-Control Element in the Body of Earth Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction — Power Technology and Engineering]. 2013, no. 8, pp. 2–9. (In Russian)

17. Aliev N.A. Patent No. 130322 RU, MPK E02B 7/06, E02B 3/16. Gruntovaya plotina [Patent No. 130322 RU, MPK E02B 7/06, E02B 3/16. Earth Dam]. Patent holder OAO "Lengidroproekt", No. 2013111020/13, appl. 12.03.2013, publ. 20.07.2013, bulletin no. 20. (In Russian)

18. Garkin A.S. Patent No. 151898 RU, MPK E02B 7/06, E02B 3/16. Gruntovaya plotina [Patent No. 151898 RU, MPK E02B 7/06, E02B 3/16. Earth Dam]. Patent holder OAO "Lengidroproekt", No. 2014144558/13, appl. 05.11.2014, publ. 20.04.2015, bulletin no. 11. (In Russian)

19. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S., Sainov M.P. Betonnyaya diafragma kak element rekonstruktsii gruntovoy plotiny [Concrete Diaphragm as an Element of Reconstruction of Earth Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1999, no. 4, pp. 10–16. (In Russian)

20. Sainov M.P. Vliyanie zhestkosti materiala protivofil'tratsionnoy steny v osnovanii gruntovoy plotiny na ee prochnost' [Impact of Rigidity of the Seepage-Control Wall Material in the Base of Earth Dam on its Strength]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2016, no. 3 (39), pp. 62–69. (In Russian)

21. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Sainov M.P. Vybora sostava glinotsementobetona pri sozdaniy "steny v grunte" [Choice of Composition of Clay Cement Concrete when Creating a Slurry Wall]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction — Power Technology and Engineering]. 2014, no. 3, pp. 16–23. (In Russian)

22. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Sainov M.P. Prochnost' i deformativnost' glinotsementobetona v slozhnom napryazhenom sostoyanii [Strength and Deformability of Clay Cement Concrete in Combined Stress State]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction — Power Technology and Engineering]. 2014, no. 8, pp. 29–33. (In Russian)

23. Sainov M.P. Vychislitel'naya programma po raschetu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh plotin : opyt sozdaniya, metodiki i algoritmy [Computer Program for Calculation of a Stress-Strain State of Earth Dams : Experience of Creation, Methods and Algorithms]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013, vol. 9, no. 4, pp. 208–225. (In Russian)

24. Rasskazov L.N., Dzhukha Dzh. Deformiruemost' i prochnost' grunta pri raschete vysokikh gruntovykh plotin [Deformability and Strength of Soil in Calculation of High Earth Dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1997, no. 7, pp. 31–36. (In Russian)

Received in October, 2016

About the authors: **Sainov Mikhail Petrovich** — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mp_sainov@mail.ru;

Kudryavtsev Grigoriy Mikhaylovich — Assistant, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; gregik@mail.ru.

For citation: Sainov M.P., Kudryavtsev G.M. Vliyanie deformiruемости materiala protivofil'tratsionnoy diafragmy, vypolnennoy v gruntovoy plotine metodom «stena v grunte», na ego prochnost' [Impact of Deformability of Material of Seepage-Control Diaphragm Installed in Earthfill Dam Using the Slurry Wall Method on Strength of the Material]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 2 (101), pp. 214–221. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.214-221