

УДК 532.546.3

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НА ФОРМУ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

© 2024 г. А. А. Таирова*, Н. А. Юдочкин, Г. В. Беляков

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: tairova.aa@idg.ras.ru*

В статье приведены результаты экспериментов, задачей которых являлось физическое моделирование фильтрации жидкости в теле дамбы из насыпного грунта. В работе рассмотрена устойчивость такого сооружения при воздействии на него фильтрационного потока. Предложенная модель позволяет визуализировать процессы смачивания и насыщения тела насыпной дамбы с последующим массопереносом частиц и изменением ее геометрии. Получены параметры, позволяющие определить точку на склоне, соответствующую предельному состоянию, при котором может возникнуть неустойчивость.

Ключевые слова: фильтрационный фронт, сыпучая среда, устойчивость насыпной среды.

Для цитирования: Таирова А.А., Юдочкин Н.А., Беляков Г.В. Воздействие фильтрационного потока на форму сыпучей среды // Динамические процессы в геосферах. Т. 16. № 4. С. 83–89. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_83

Введение

Оценка устойчивости насыпных дамб и хвостохранилищ является актуальной проблемой. Несмотря на большое количество используемых методов при мониторинге гидротехнических сооружений, например [Калашник и др., 2014; Ефремов, 2021], регулярно происходят аварийные ситуации, которые не только нарушают инфраструктуру, но и представляют серьезную угрозу жизни и здоровью людей. Только в 2024 г. произошло несколько крупных наводнений (рис. 1) на Южном Урале, Сибири, Дальнем Востоке; и эта ситуация из года в год повторяется.

Множество работ посвящено изучению устойчивости насыпных сооружений и причин их разрушений, например, [Смоляницкий, 2006; Табуев, 2010; Динь и др., 2020]. В частности, в [Анискин, Ступивцев, 2023] с помощью методов численного моделирования рассмотрено влияние разных факторов на фильтрационный режим насыпной плотины при сработке верхнего бьефа

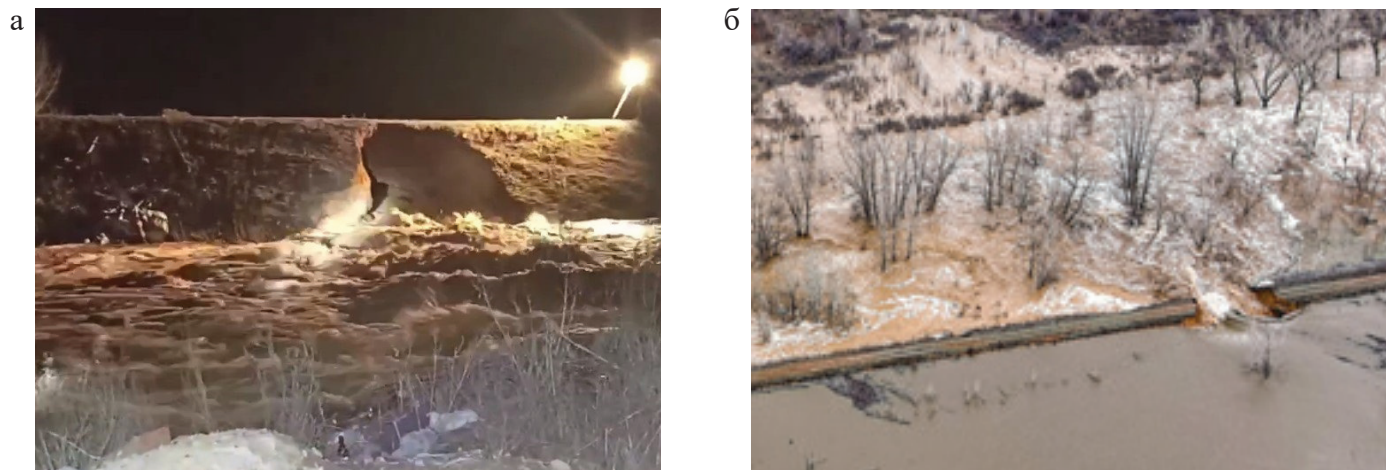


Рис. 1. Прорыв дамбы в г.Орске (фото взято из Интернета, открытый доступ)

водохранилищ. При этом образование в теле дамбы фильтрационных деформаций рассматривается в качестве основного механизма. В работе [Бахаева, Гурьев, 2020] представлен метод оперативного прогнозирования параметров грунтовых дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта. Тем не менее, знание многих параметров: свойств грунтов, их слоев и укладки, временных и фильтрационных режимов – недостаточно для понимания, как именно развиваются процессы фильтрации в теле земляной насыпи.

Целью данной работы является визуализация фильтрационных процессов в физической модели насыпной дамбы, позволяющей в режиме реального времени наблюдать течение жидкости в пористой среде и последующем массопереносе. Как правило, дамбы имеют протяженную длину и строятся для защиты низменностей в долинах крупных рек или для регулирования направления их русел. Решить данную задачу аналитически или численно, исходя из рассматриваемых допущений и граничных условий, не представляется возможным.

Экспериментальная установка и методика проведения опытов

Исследование проводилось на экспериментальной установке, состоящей из ячейки Хеле-Шоу и объема с жидкостью, подаваемой в исследуемую область (рис. 2). Ячейка представляет собой 2 стеклянные пластины (1), расположенные вертикально вдоль длинного торца, зазор между ними составляет 3 мм. В ячейку засыпался кварцевый песок с размером частиц 0.2–0.3 мм, слой которого представлял собой равнобедренный треугольник (2) с углом у основания $\alpha \approx 34^\circ$, угол внутреннего трения сухого песка в зависимости от размера составляет 30° – 35° . Таким образом, треугольная форма слоя засыпанного песка имитировала поперечный разрез «дамбы». По обе стороны от этого песчаного треугольника располагались входное (3) и выходное (4) отверстия для подачи и отвода жидкости из ячейки. Уровень жидкости, вошедшей справа от песчаной насыпи, поддерживался постоянным.

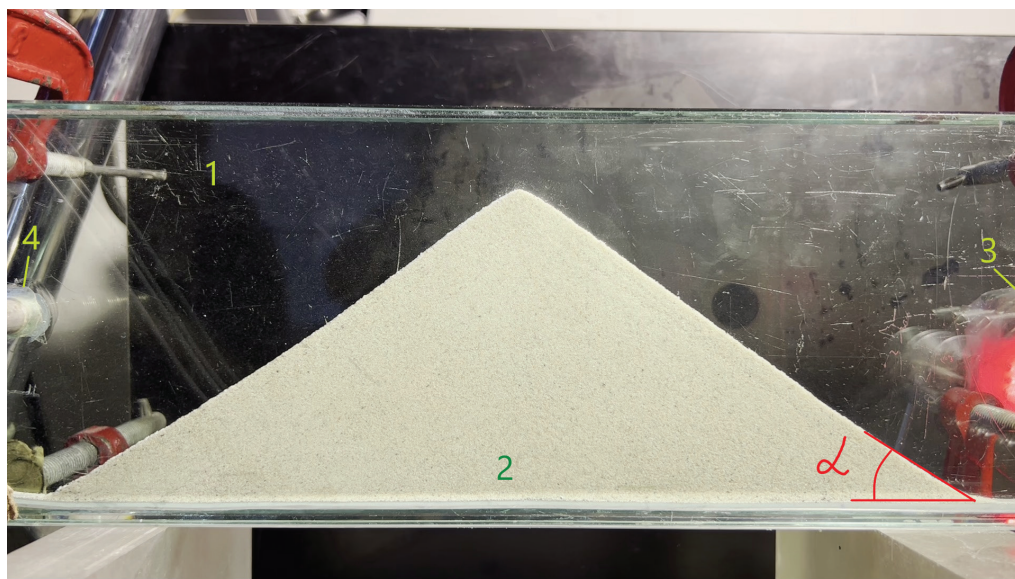


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – стеклянные пластины, 2 – песчаный слой, 3 – входное отверстие для подачи жидкости, 4 – выходное отверстие для отвода жидкости из ячейки

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 3 приведены последовательные стадии фильтрации жидкости в теле насыпной «дамбы» (рис. 3а). Жидкость, вошедшая в ячейку, сначала поднимается на небольшую высоту (примерно 2 см), затем смачивает пористый слой. Подъем уровня в «водохранилище» происходит с постоянной скоростью 1 см/с. Линия фронта фильтрации в сыпучей среде сначала движется параллельно склону. По мере подъема жидкости в «водохранилище» фильтрационный фронт меняет свой наклон из-за того, что поток в самой нижней части начинает двигаться быстрее (рис. 3б); максимальная скорость фронта на нижней линии составляет ~ 6 см/с (рис. 4, красная линия). Флюид в средней части тела «дамбы»

движется медленнее; максимальная скорость фронта на середине высоты «дамбы» достигает ~ 4 см/с (рис. 4, синяя линия).

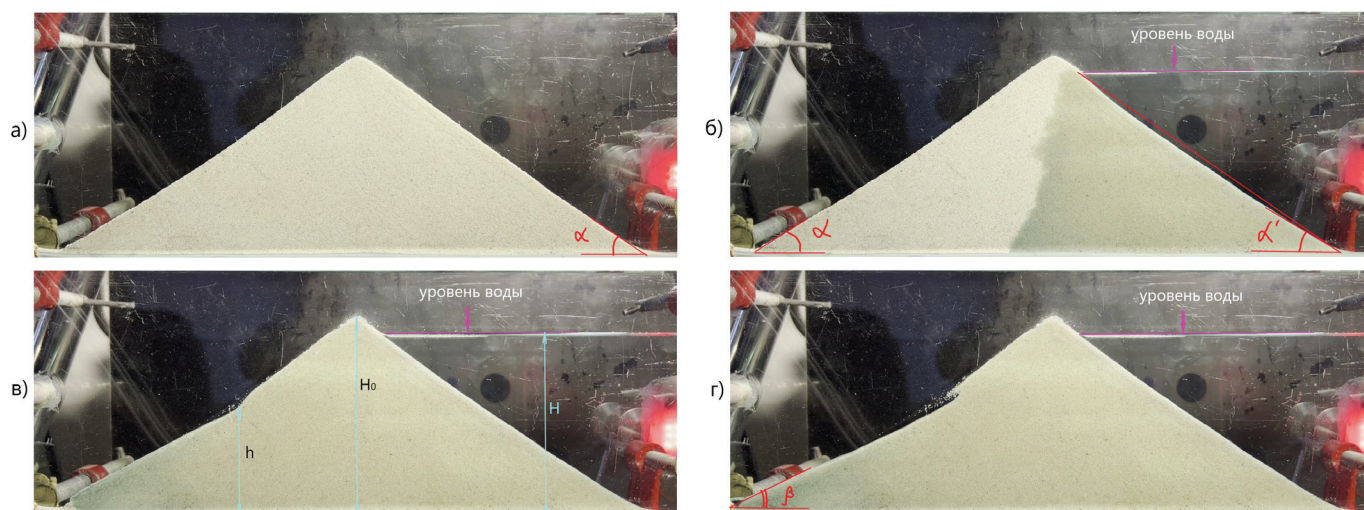


Рис. 3. Последовательные стадии эксперимента по фильтрации жидкости в сыпучей среде: α – угол сухого склона, α' – угол после смачивания склона со стороны «водохранилища», β – угол свободного склона после изменения геометрии «дамбы»; H_0 – высота «дамбы»; H – высота воды в «водохранилище» (поддерживается постоянной); h – высота образования неустойчивости

Более высокая скорость потока в нижней части «дамбы» связана с тем, что давление жидкости с глубиной повышается. На рис. 4 приведены зависимости скоростей фронта фильтрации жидкости по нижней и по медианной линиям «дамбы» от времени, нормированные на максимальные значения, показывающие их качественное подобие.

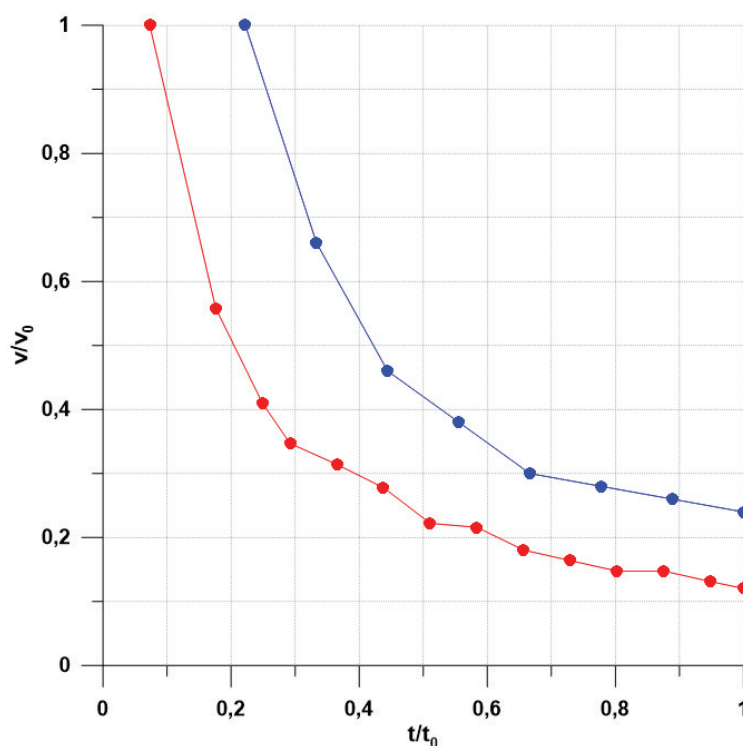


Рис. 4. Зависимость отношения текущей скорости к максимальной от отношения текущего времени к полному времени фильтрации. Синяя линия – горизонтальная скорость фильтрационного фронта жидкости на середине высоты «дамбы», красная линия – горизонтальная скорость фильтрационного фронта жидкости по нижней линии «дамбы»

После заполнения «водохранилища» уровень жидкости поддерживается постоянным. Несмотря на то, что уровень жидкости не доходит до самой вершины порядка сантиметра, смачивание песка на самой верхушке происходит в результате действия капиллярных сил. Склон со стороны «водохранилища» практически не меняет своей геометрии, проседая лишь на 1–2 мм в центральной части, образуя едва уловимый невооруженным глазом прогиб, угол склона уменьшается на 2° относительно начального значения и составляет $\alpha' = 32^\circ$. По мере того, как жидкость доходит до противоположного склона, профильтровавшись через тело «дамбы», вода начинает вытекать из нее по свободной поверхности тонким слоем (рис. 3в). Положение депрессионных кривых, приведенных в работе [Анискин, Ступивцев, 2023], соответствует линиям тока жидкости через тело «дамбы» (рис. 5). Граница сухого и влажного песка, расположенная параллельно малиновой линии, имеет уклон вниз от уровня воды в «водохранилище».

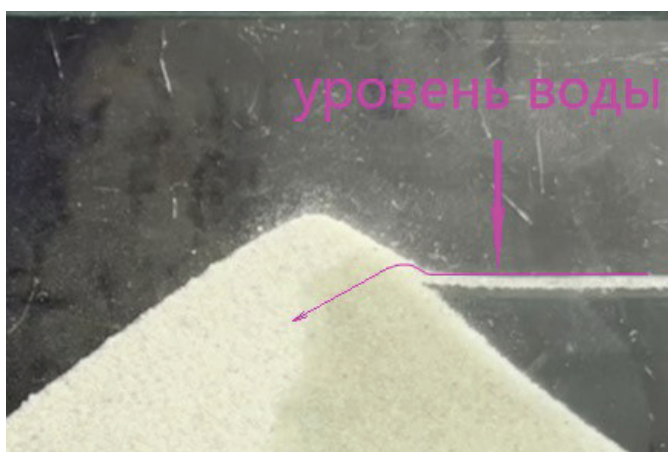


Рис. 5. Направление линий тока жидкости в теле «дамбы». Линии тока направлены вниз под углом от уровня воды в «водохранилище»

Учитывая, что насыщенная среда теряет прочность, и сила, с которой жидкость при фильтрации давит в горизонтальном направлении на частицы, в нижней части склона «дамбы» превосходит силу сцепления песчинок между собой, частицы со свободной поверхности насыпи на высоте h захватываются потоком и перемещаются вниз. Граница покоящихся частиц верхней части «дамбы»

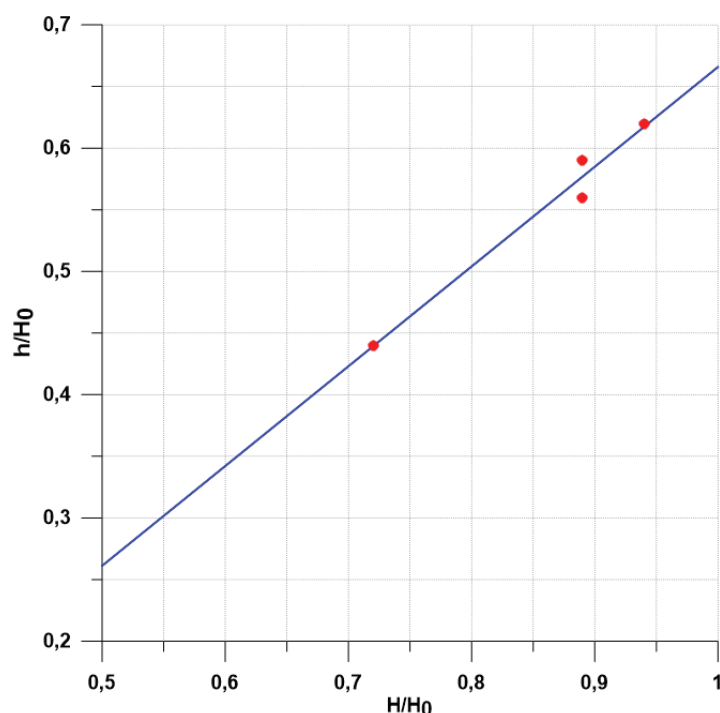


Рис. 6. Относительная высота образования неустойчивости от относительного уровня «водохранилища»

неустойчива. Стекающий поток, уносящий с собой частицы, изменяет геометрию нижней части склона, уменьшая его угол (рис. 3г) с 34° до 20° , тогда как табличные значения угла внутреннего трения у мокрого песка 20° – 27° в зависимости от размера частиц. Со временем поток вымывает все больше частиц, возникает промоина, которая растет как вглубь, так и вверх. На рис. 6 приведена зависимость высоты образования неустойчивости h в зависимости от геометрических параметров «дамбы» H_0 и уровня жидкости H .

В диапазоне $H/H_0 = 0.7 \div 0.95$ зависимость описывается линейной функцией $h/H_0 = 0.809 H/H_0 - 0.1435$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.9751$. Полученная функция, связывающая относительную высоту образования неустойчивости и уровень жидкости в «водохранилище» (когда уровень превышает полувысоты «дамбы»), является характеристикой среды и может быть использована при моделировании и проектировании насыпных дамб. Принимая во внимание данные на рис. 6, можно полагать, что при увеличении уровня жидкости в водохранилище увеличится и высота неустойчивости, со временем перерастающей в промоину. По мере насыщения дамбы промоина размывается, и поток смывает верхушку дамбы (рис. 7).



Рис. 7. Геометрия «дамбы» после смыва вершины

Выводы

Проведено лабораторное исследование фильтрации жидкости через тело насыпной «дамбы» в плоском случае. В результате анализа фотоизображений было установлено, что зависимости изменения со временем горизонтальной скорости в основании дамбы и на середине ее высоты подобны. Фильтрационный фронт внутри пористого слоя со временем разворачивается, меняя свой наклон относительно основания, и выходит на свободную поверхность практически по всей ее длине одновременно. На основе экспериментальных данных произведена оценка высоты образования неустойчивости на склоне дамбы в результате фильтрации жидкости через нее, что позволило установить эмпирическую корреляционную зависимость между относительной высотой образования промоины и относительным уровнем жидкости в водохранилище. Данные параметры могут позволить специалистам определить точку на склоне, соответствующую предельному состоянию, при котором может возникнуть неустойчивость.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

Список литературы

- Анискин Н.А., Ступивцев А.В. Влияние факторов на фильтрационный режим земляной плотины при сработке верхнего бьефа // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 917–926. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.6.917-926>
- Бахаева С.П., Гурьев Д.В. Прогноз устойчивости насыпных дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств суглинистых грунтов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 1. С. 23–32. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20200103>
- Динь Т.Х., Фоменко И.К., Вязкова О.Е., Сироткина О.Н. Изучение условий возможной потери устойчивости дамб в период паводка (на примере дамбы г. Ханой) // Инженерная геология. 2020. Т. 15. № 1. С. 6–19. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-1-6-18>
- Ефремов Е.Ю. Анализ процесса деформирования грунтовой дамбы при заполнении чаши хвостохранилища // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 6. С. 178–185. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/06/3248>
- Калашиник А.И., Калашиник Н.А., Запорожец Д.В. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. Т. 6. № 143. С. 92–98.
- Смоляницкий Л.А. Оценка устойчивости земляных сооружений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2006. № 2. С. 225–239.
- Табуев В.П. Оценка устойчивости откосов строящейся каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2010. № 2. С. 123–131.

EFFECT OF FILTRATION FLOW ON THE FORM OF BULK MEDIUM

© 2024 A. A. Tairova*, N. A. Iudochkin, G.V. Belyakov

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: tairova.aa@idg.ras.ru*

The article presents the results of experiments aimed at physical modeling of liquid filtration in the body of a dam made of bulk soil. The paper examines the stability of such a structure when exposed to a filtration flow. The proposed model allows visualizing the processes of wetting and saturation of the body of a bulk dam with subsequent mass transfer of particles and changes in its geometry. Parameters are identified that allow determining the point on the slope where the soil is in a limiting state and instability may occur.

Keywords: filtration front, bulk medium, bulk medium stability.