

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД В ПОРОДАХ СКЛОНА С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОЙ И ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛЕЙ

М. Джасвал, Р. К. Синха, Ф. Сен

*Индийский институт технологий,
E-mail: rksinha@iitism.ac.in, 826004, г. Дханбад, Джаркханд, Индия*

Рассмотрено влияние уровня грунтовых вод на устойчивость склонов. Для установления механизма фильтрации воды в породах склона разработан экспериментальный лабораторный стенд, включающий имитационную модель отвала из грунтового материала и отражающий фактические параметры и геометрию отвалов вскрышных пород, возведенных выше нулевой линии с углом наклона основания $0-5^\circ$. Выполнено сравнение результатов определения поверхности грунтовых вод физическим моделированием и численными расчетами в среде программного обеспечения SEEP/W.

Поверхность грунтовых вод, подземные воды, фильтрация, напор, склон, отвал, насыпь, физическое и численное моделирование, фильтрационный расчет, сравнение, устойчивость

DOI: 10.15372/FTPRPI20200318

Силы, возникающие при фильтрации воды в естественных или искусственных склонах, влияют на их устойчивость. При проектировании искусственного склона важно корректно оценить силы фильтрации воды, чтобы не допустить потерю устойчивости и аварийных ситуаций, а также правильно организовать дренаж. В целях предотвращения разрушения и минимизации возможных опасностей для окружающей среды следует тщательно выбирать подход к проектированию безопасной формы склона искусственной насыпи (отвалов вскрышных пород и хвостов обогащения). Как негативный пример следует привести происшествие в штате Минас-Жерайс (Бразилия), когда 25.01.2019 г. разрушился отвал хвостов обогащения и погибло 212 человек [1]. Причины разрушения техногенных насыпей — подвижки и оползни из-за потока фильтрационных (грунтовых) вод [2, 3]. Для обеспечения максимальной устойчивости насыпи и безопасности эксплуатации необходимо до начала строительства выполнять все требуемые научные и инженерные исследования.

Некоторые выработки проходятся ниже уровня подземных вод, что приводит к снижению устойчивости склонов [4, 5]. Уровень подземных вод в открытых выработках варьирует от 50 до 150 м от поверхности. Это влияет на экономические показатели горных работ [6, 7].

При проектировании склона необходимо установить горизонт грунтовых вод, который определяется как граница между насыщенным и ненасыщенным водой массивами, где поровое давление равняется нулю относительно атмосферного давления [8]. Для анализа устойчивости склонов параметры поверхности грунтовых вод получают опытным путем. Устойчивость отвалов породы и хвостов обогащения зависит от характеристик фильтрации воды: конфигурации и расположения уровня грунтовых вод, капиллярной каймы и ненасыщенной области в массиве отвала [9]. Колебания уровня воды могут оказывать воздействие на поровое давление в грунте склона, что может стать главной причиной разрушения склона. Из-за повышения уровня воды растет объемный вес массива склона, это связано с заполнением пустот в породе (грунте) водой и сопровождается увеличением удельной массы среды и уменьшением эффективного нормального напряжения [10, 11]. Для проведения анализа устойчивости склона важно рассчитать поровое давление воды или поверхность грунтовых вод в массиве склона, а при использовании шведского метода скольжения круга или метода Бишопа следует знать коэффициент фильтрации, когезионную прочность, плотность, угол внутреннего трения и конфигурацию уровня грунтовых вод [12]. В [13] выявлено, что расположение поверхности грунтовых вод, как и ее высота, влияет на фактор безопасности склона, а снижение высоты поверхности грунтовых вод приводит к повышению устойчивости склона.

В настоящее время требуется надежный метод прогнозирования уровня грунтовых вод. Помимо информации о расположении горизонта грунтовых вод, важно исследовать движение потока подземных вод. Это актуально для технологической безопасности возведения отвала и экологической составляющей [14].

Анализ устойчивости склона выполнен с учетом эффективного напряжения, которое необходимо для распределения порового давления воды в массиве насыпи. Он нужен для дальнейшего понимания системы потока подземных вод. Приток подземных вод через откосы бортов в открытых выработках появляется за счет атмосферных осадков [15]. Вода проникает в техногенную насыпь, образуя водоносный горизонт. Количество и скорость потока через породу (грунт, грунтоподобный материал) негативно влияют на устойчивость склона (рис. 1) [16, 17].

Устойчивость откоса борта (для режима разрушения определяется геологическими нарушениями) можно проанализировать, рассмотрев распределение давления воды (рис. 1а). Вдоль потенциальной плоскости разрушения за счет давления воды уменьшается прочность среды на сдвиг. При этом данное давление создает подъемную силу U , которая воздействует вдоль плоскости разрушения. Сила V возникает ввиду наличия воды в трещине разрыва. Изменение расположения кривой скольжения из-за наличия водоносного горизонта в склоне отвала показано на рис. 1б.

У склонов отвалов или насыпей породы имеются другие параметры, влияющие на устойчивость склонов: топография, проницаемость грунта (породы), температурные изменения и нарушения в породе [18]. Механизм снижения фактора безопасности склона математически выражается как

$$S = (\sigma - \mu)\operatorname{tg}\varphi + c, \quad (1)$$

где S — прочность на сдвиг; σ — нормальное напряжение к плоскости скольжения; μ — поровое давление воды; φ — угол внутреннего трения; c — когезионная прочность.

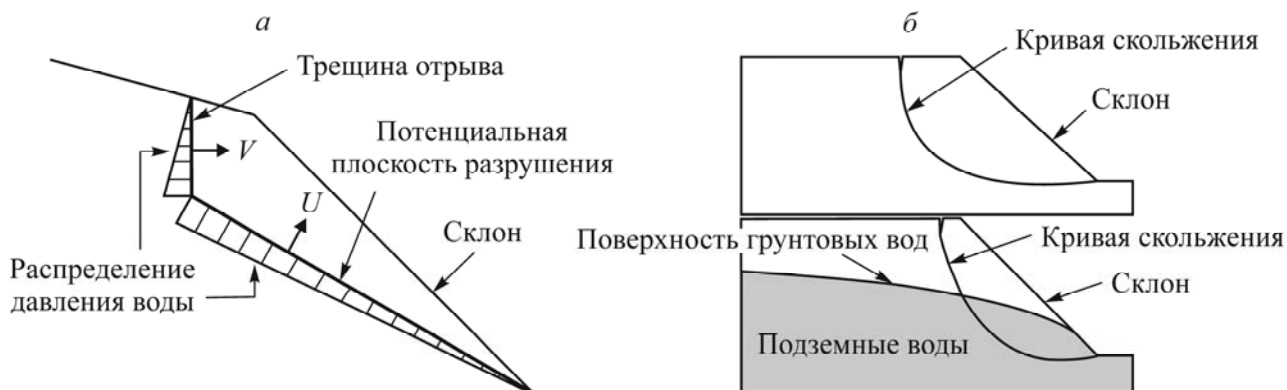


Рис. 1. Влияние воды на устойчивость склона: а — распределение давления воды; б — изменение расположения кривой скольжения ввиду наличия водного горизонта в склоне отвала (*U* — подъемная сила, *V* — сила, возникающая из-за наличия воды в трещине разрыва)

Наличие в отвалах пород и насыпей грунтовых вод (влаги) ведет к снижению прочности. В [19] показано, что при повышении содержания влаги уменьшается когезионная прочность среды отвала. Исследование уровней грунтовых вод и их характеристик необходимо для обеспечения устойчивости насыпей, отвалов вскрышных пород и хвостов обогащения. Данные объекты подвергаются таким разрушениям, как движение и обрушение грунта, потеря воды и неустойчивость склонов.

Цель настоящей работы — изучение контура поверхности грунтовых вод и его поведения в массиве однородной насыпи, а также прогнозирование характеристик и расположения уровня грунтовых вод в массиве склона отвала перед возведением. Полученные знания можно использовать в проектировании искусственных склонов (откосов бортов, отвалов пустых или вскрышных пород, насыпи и т. д.), анализе оползней и прогнозировании уровня водоносного горизонта в скважинах и техногенных выемках.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Закон Дарси описывает поток воды в насыщенных и ненасыщенных грунтах следующим образом:

$$v = ki, \tag{2}$$

где *v* — скорость фильтрации Дарси; *k* — коэффициент фильтрации; *i* — общая разница гидравлического напора.

При аналитическом и численном решении задач, связанных с потоком воды в массиве склона, учитывается скорость фильтрации Дарси. Установившийся поток, в основе которого лежат закон Дарси и закон сохранения массы, представлен в виде уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0.$$

Здесь *h* — общий гидравлический напор; *k_x*, *k_y*, *k_z* — гидравлическая проводимость (коэффициент фильтрации) по направлениям *x*, *y*, *z* соответственно. Для однородной и изотропной среды *k_x* = *k_y* = *k_z*.

Закон Дарси и принцип неразрывности (равенство входного и выходного количества воды в среде) формируют математическую основу для решения задач фильтрации подземных вод, с помощью графического метода — гидродинамической сетки потока, которая применима только для ограниченной среды, когда границы известны и установлены [20]. При решении задач фильтрации в массиве склона в неограниченной среде верхняя граница потока неизвестна. В этом случае важно определить контур верхней границы фильтрации — поверхности грунтовых вод [21]. Гидростатическое давление выше поверхности грунтовых вод считается отрицательным, ниже — положительным [22]. Поверхности грунтовых вод, образуемые в стандартных насыпях, имеют выпуклую вверх форму [9].

Уравнение поверхности грунтовых вод можно описать с помощью предположений Дюпюи – Форхгеймера для условий двумерной среды [23]. Гипотеза Дюпюи утверждает, что скорость фильтрации постоянна вдоль вертикального направления и нормальна направлению потока [24, 25]. Уравнение Дюпюи основано на законе Дарси (2) [26].

По первому предположению Дюпюи – Форхгеймера эквипотенциальные линии вертикальные, а поток горизонтальный. При незначительном изменении уклона линии фильтрации глубина гидравлического напора остается неизменной: $h(x, y) = h(x)$. Второе предположение гласит, что гидравлический градиент, который приводит к движению воды, равен уклону водоносного горизонта. Так как линии потока горизонтальны, гидравлический градиент $i = \text{tg} \theta$. Математически второе предположение выражается как $i = \delta h / \delta x$. Это уравнение можно записать следующим образом: $H^2 = H^2 - [(L - x) / L](H^2 - h_e^2)$.

На рис. 2 показано изменение гидравлического напора по параболе. Полученное решение корректно для малых углов насыпи. В случае больших углов из-за граничных условий накапливаются ошибки.



Рис. 2. Расчетная схема задачи Дюпюи для потока

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В МАССИВЕ СКЛОНА

В [27] затрагивается проблема определения уровня грунтовых вод, возникающих в насыпях и отвалах хвостов обогащения. Немного работ в научно-технической литературе посвящено изучению уровня грунтовых вод в склонах отвалов, в частности расположенных на наклонном основании. Разработан специальный лабораторный стенд, позволяющий моделировать отвалы вскрышных/пустых пород на фактических открытых выработках, которые размещаются на наклонном основании с различной высотой водоносного горизонта в массиве склона. До проведения экспериментов по фильтрации устанавливаются характеристики материала склона: коэффициент фильтрации и распределение частиц по размеру. Заключительный этап исследований — сравнение результатов физического и численного моделирования.

Характеристики материала, использованного при физическом моделировании. В качестве эквивалентного материала, имитирующего однородный склон, применялся песок. Этот материал анализировался на наличие включений: гравия, осадочных пород, глины. Кривая распределения частиц материала по размеру представлена на рис. 3. Видно, что эквивалентный материал — песок плохого гранулометрического состава с включениями до 36.59 %.

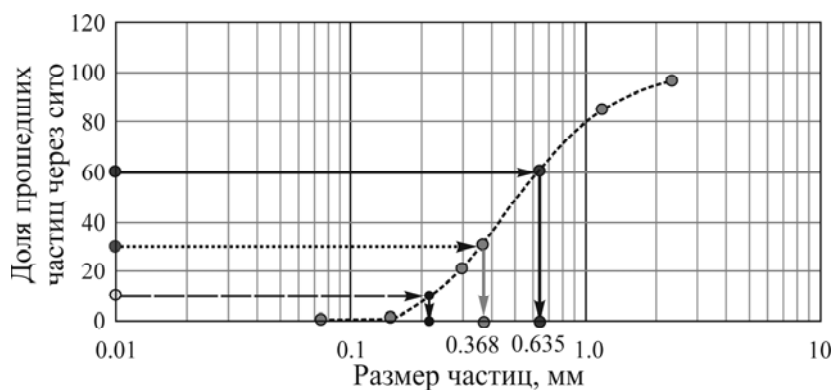


Рис. 3. Кривая распределения частиц материала по размеру

Коэффициент фильтрации определяется как скорость прохождения потока жидкости через единицу сечения при гидравлическом градиенте, равном единице в условиях ламинарного движения [28, 29]. Коэффициент фильтрации для используемого песка ($9.93 \cdot 10^{-4}$ м/с) устанавливался экспериментами в лаборатории с помощью теста убывания напора и применялся при численном моделировании.

Разработка и построение экспериментальной установки. Многие исследователи изучали влияние масштаба, сравнивая лабораторные модели с фактическими склонами [30]. Корректность физического моделирования механизмов разрушения склона и других сопутствующих процессов основана на соблюдении масштабов подобия. В данной работе основное внимание обращено на форму и расположение уровня грунтовых вод при условии статического напора, поэтому влияние масштаба не учитывается. На рис. 4 представлена трехмерная модель разработанного лабораторного стенда.

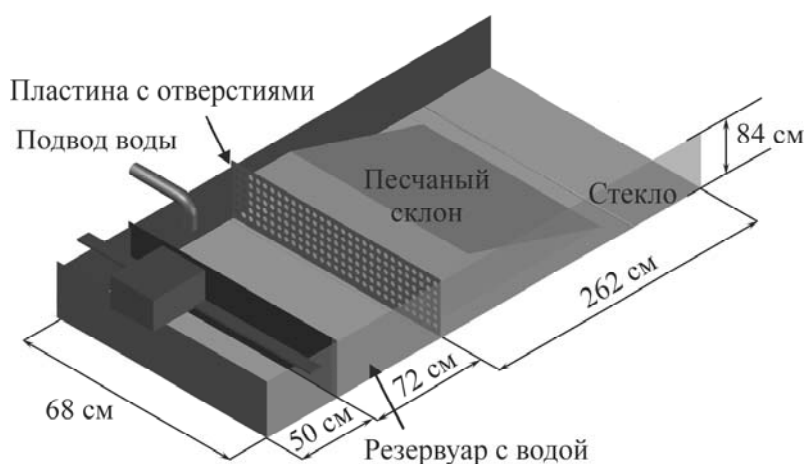


Рис. 4. 3D-модель лабораторного стенда

На рис. 5 показана конструкция стенда в лабораторных условиях. Габаритные размеры модели: длина 3.84 м, высота 0.84 м и ширина 0.68 м. Две стенки стенда изготовлены из стали, одна — из акрилового стекла, через которое можно наблюдать за фильтрацией воды в массиве склона. Для проведения необходимых измерений стекло оснастили размерной сеткой 5×5 см. Стенд разделили на три секции. Первая вмещала механическую часть для изменения наклона основания отвала от 0 до 5° , что соответствует практическим данным в реальных условиях. Средняя секция применялась как резервуар для воды, к ней подводилась труба для непрерывного подвода воды, также имелись проходы для обеспечения непрерывного напора в следующую секцию. Третья секция содержала песок, моделирующий массив склона. Между второй и третьей секцией поместили пластину с отверстиями диаметром 5 мм, позволяющими воде просачиваться в массив склона, моделируя водный горизонт. Правый торец стенда оставался открытым для улавливания воды, проходящей во время эксперимента через склон.

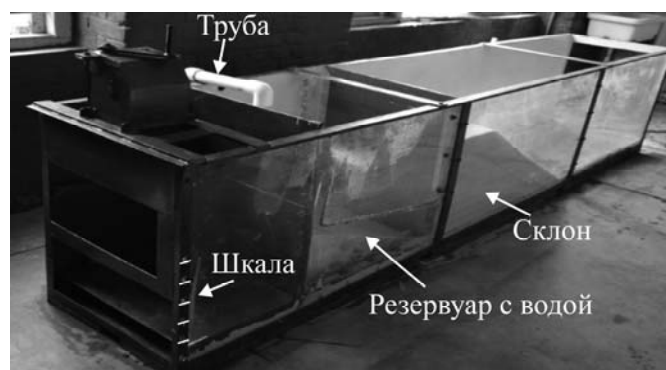


Рис. 5. Лабораторный стенд

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В правой части установки построен однородный склон из грунтоподобного материала, который наносился слоями. Сформированный склон имел длину 1.10 м, высоту 0.50 м, ширину 0.30 м и угол 32° . Выполнено шесть экспериментов. Первый осуществлялся при горизонтальном положении основания склона, остальные — с углом наклона 1, 2, 3, 4 и 5° соответственно. После возведения насыпи начиналась подача воды. Напор поддерживался на уровне 20 см от основания. В ходе эксперимента вода просачивалась в массив склона, образуя выраженную насыщенную область. По мере фильтрации воды с края склона данная область становилась менее заметной. Итоги выполненных экспериментов фиксировались с помощью фотосъемки. В качестве результатов выступали свойства моделируемой среды и установившегося потока. Лабораторные исследования показали, что линия поверхности грунтовых вод имеет форму, близкую к параболе. На рис. 6 изображены результаты физического моделирования.

Математическая модель состояния подземных вод описывается законом Дарси и законом сохранения массы. Решения практических задач фильтрации подземных вод аналитическими методами малоэффективны ввиду идеализации условий [31, 32]. Наиболее успешным является моделирование: результаты максимально приближены к реальным условиям. Существует множество методов численного моделирования, которые можно использовать при решении задач фильтрации. Выделяют два метода: конечных элементов и конечных разностей [33, 34]. Широко применяется метод конечных элементов из-за возможности решения сложных практических задач [35]. С целью определения расположения поверхности грунтовых вод в однородном склоне проведен конечно-элементный анализ.

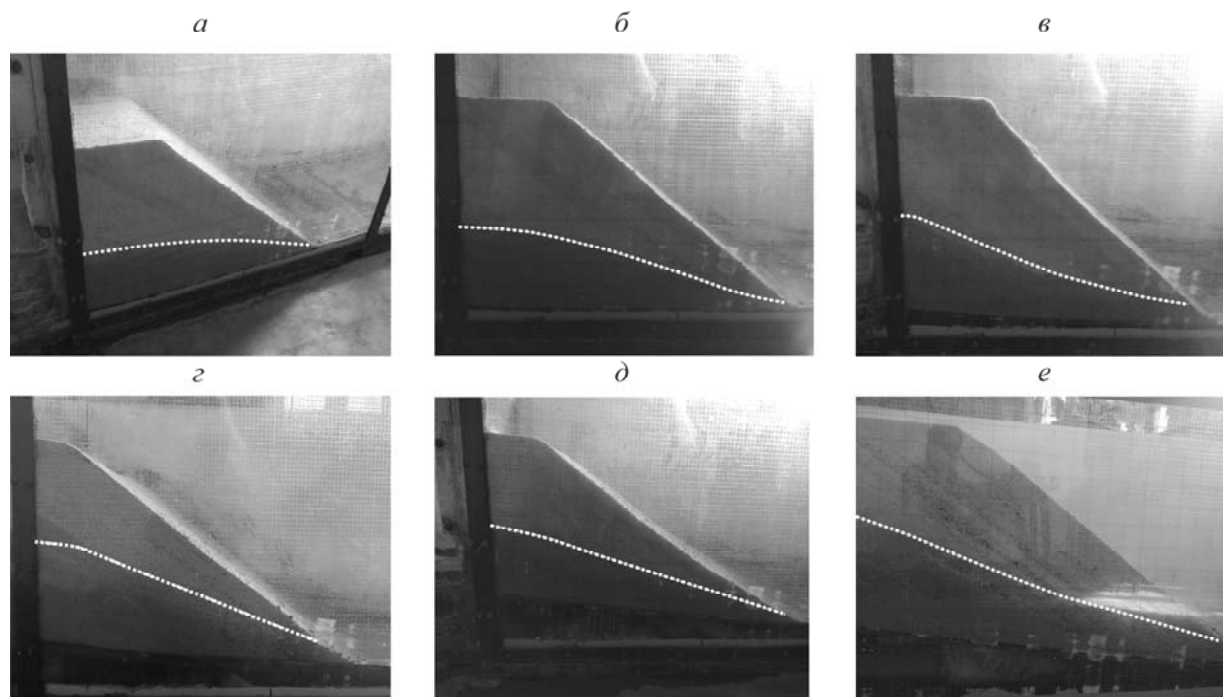


Рис. 6. Результат физического моделирования. Поверхность грунтовых вод при горизонтальном основании 0° (а) и наклоне основания 1° (б), 2° (в), 3° (г), 4° (д), 5° (е)

Для верификации результатов физического эксперимента численное моделирование выполнялось в программном комплексе SEEP/W — инструменте для исследований фильтрации подземных вод, распределения порового давления воды в пористой среде, породе и грунте. С помощью программ SEEP/W рассчитывают коэффициент фильтрации, среднюю скорость узлов, градиенты и поверхность грунтовых вод. Комплекс позволяет определить выходную точку поверхности грунтовых вод и скорректировать граничные условия по свободным поверхностям фильтрации [36]. В [10, 27, 31, 37, 38] предлагается использовать SEEP/W для численного моделирования. Комплекс SEEP/W может работать с временными графиками насыщенных и ненасыщенных областей с учетом фактора времени и графиками насыщенного установившегося потока, которые применяются в гражданском и горном строительстве при решении геотехнических проблем и в гидрогеологии, и выполнять анализ установившегося и переходного процессов [39]. Анализ переходного процесса, ввиду учета временной составляющей, сложнее анализа установившегося. Модель грунта для анализа переходного процесса включает параметры давления воды, изменяющиеся во времени [40].

В настоящей работе приняты идеальные условия, т. е. полагается, что поток установившийся. Таким образом в программном комплексе SEEP/W выполнялся анализ, при котором поток и давление воды не меняются. При математическом моделировании граничные условия — постоянный поток и напор (выбрано 20 см), а также поверхность фильтрации. Свойства моделируемой среды взяты на основе физического моделирования в лабораторных условиях. Влажность насыщенной области, остаточная влажность и сжимаемость необходимы для определения функции гидравлической проводимости. Стандартные значения параметров отобраны по рекомендации разработчиков SEEP/W: коэффициент фильтрации $9.93 \cdot 10^{-11}$ м/с; сжимаемость $5 \cdot 10^{-4}$ кПа; остаточное содержание воды $5 \cdot 10^{-3}$; содержание воды в насыщенной области 0.5. Геометрия и граничные условия численной модели показаны на рис. 7. Краевые условия задачи: напор воды — 20 см (постоянен для всех моделей); дренажная поверхность, через которую происходит фильтрация воды; край склона — точка нулевого давления.

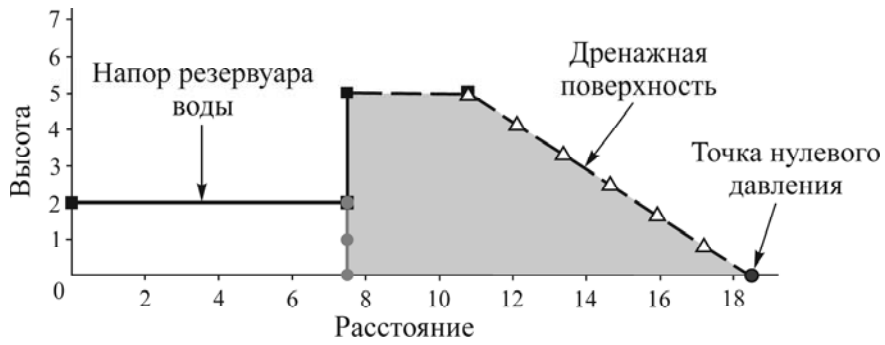


Рис. 7. Расчетная схема при численном моделировании

Поверхность грунтовых вод начинается от гидравлического напора и проходит через край склона (штриховая линия на рис. 8). Стрелки — векторы скорости, показывающие направление потока. Траектория потока обозначает путь, который пройдет единица воды в условиях установившегося потока. Они отличаются от линий течения сетки потока.

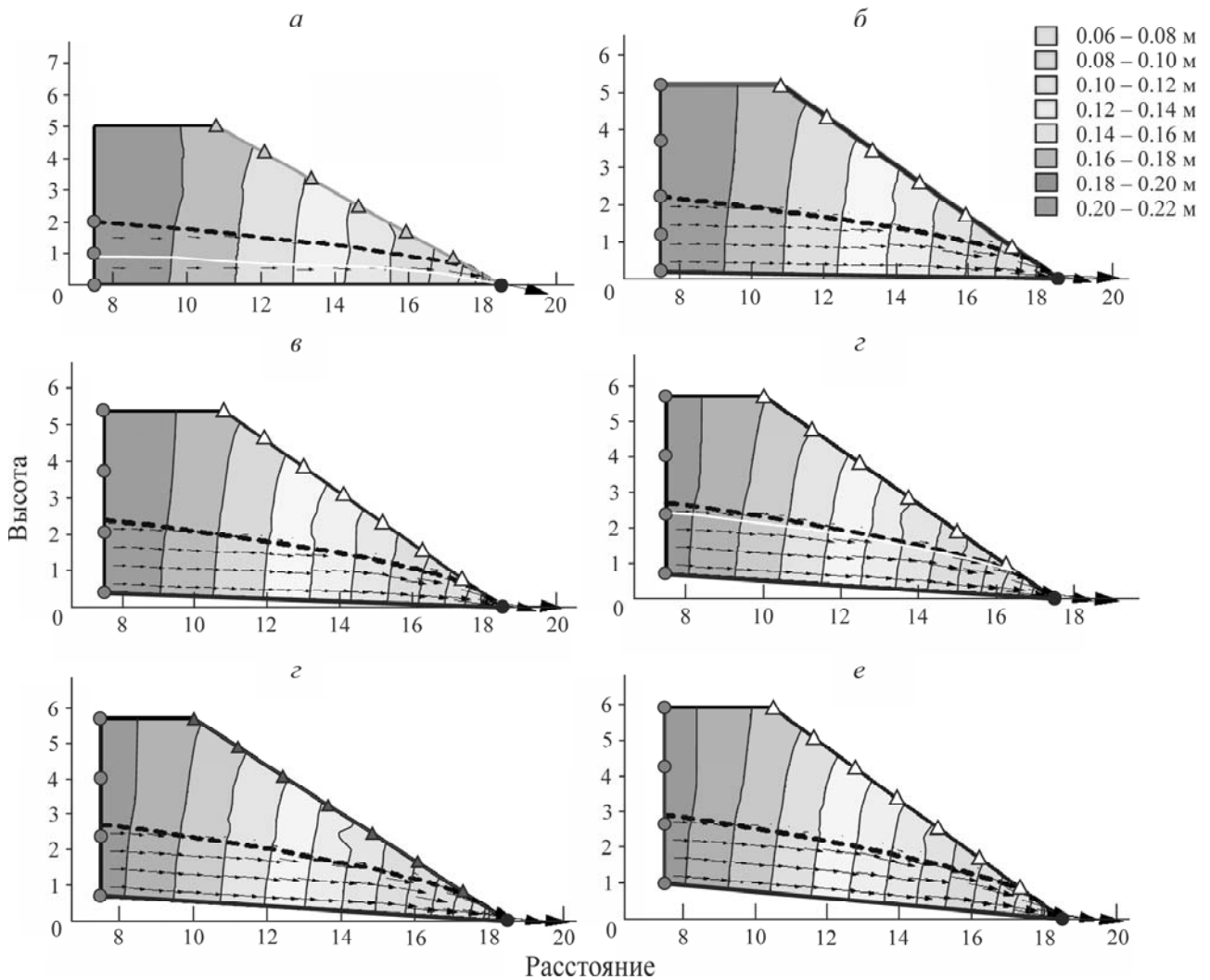


Рис. 8. Результаты численного моделирования. Поверхность грунтовых вод при горизонтальном основании 0° (а) и наклоне основания 1° (б), 2° (в), 3° (г), 4° (д) и 5° (е)

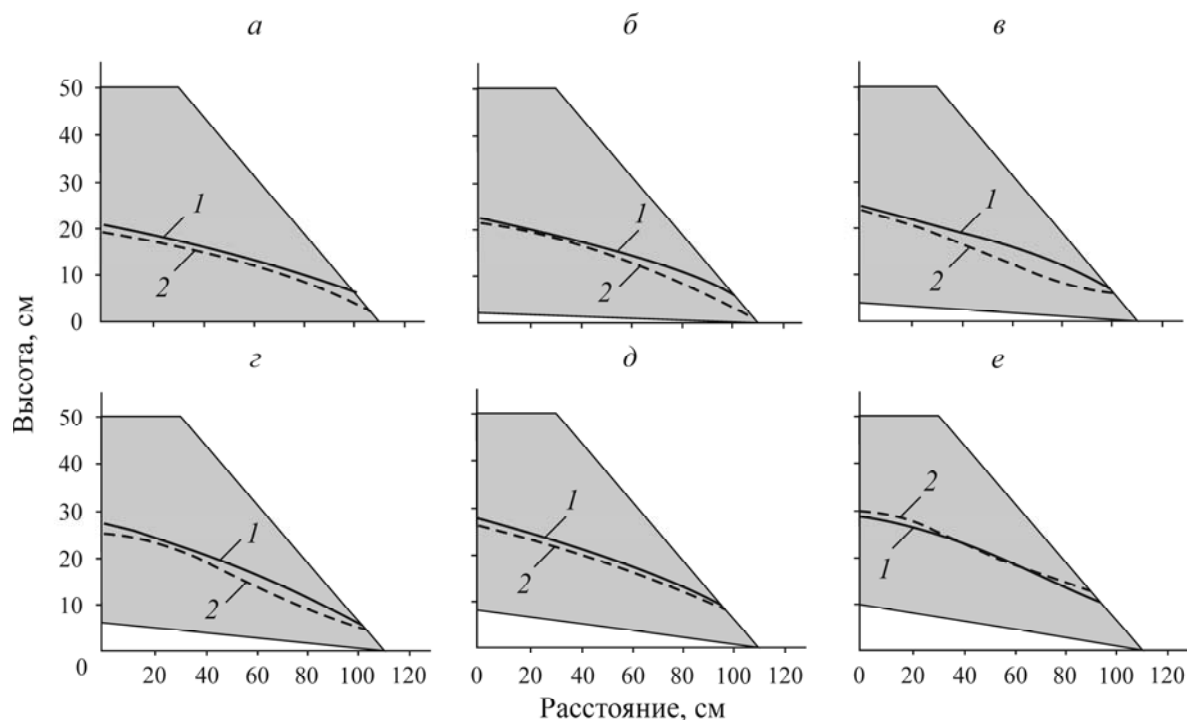


Рис. 9. Сравнительный анализ поверхностей грунтовых вод, полученных физическим (1) и численным (2) моделированием, при горизонтальном основании 0° (а), наклоне основания 1° (б), 2° (в), 3° (г), 4° (д) и 5° (е)

Результаты сопоставительной оценки физического и численного моделирования фильтрации воды в массиве склона представляются в виде сравнительных графиков (рис. 9). Поверхности грунтовых вод, полученные с помощью двух моделей, по форме близки к параболе. Имеются расхождения между координатами поверхностей: поверхности грунтовых вод становятся круче с увеличением угла наклона основания. В условиях физического моделирования меняется форма их поверхности, а при численном верхний контур грунтовых вод становится выше, чем в лабораторном эксперименте. Погрешность в установлении высоты поверхности грунтовых вод в массиве склона между двумя методами исследований не превышает 14 %, что свидетельствует о согласованности результатов физического и численного моделирования.

ВЫВОДЫ

Для определения уровня грунтовых вод в массиве склона отвалов вскрышных пород, хвостов обогащения и техногенных насыпей в лабораторных условиях разработан экспериментальный стенд, с помощью которого можно моделировать разные условия фильтрации. Результаты, полученные при проведении физического эксперимента, подтверждают теорию Дюпюи – Форхгеймера. Численным моделированием показана достоверность экспериментальных данных, что позволяет изучать вопросы, связанные с обеспечением устойчивости различных склонов при наличии подземных или грунтовых вод.

В настоящее время теория и практика изучения влияния подземных и грунтовых вод на устойчивость склонов располагает необходимым потенциалом знаний о массивах пород и отвалов, техногенных насыпях, подземных и грунтовых водах, их параметрах и характеристиках. Конечная цель этих знаний — расширение, совершенствование и создание новых подходов к оценке устойчивости склонов и выбору безопасных параметров.

Авторы благодарят руководство кафедры горного дела за финансирование разработки экспериментального лабораторного стенда, персонал лаборатории механики горных пород за логистическую поддержку и необходимую помощь, а также студента Бабулалу Рохидасу за содействие в проведении экспериментальных исследований. Авторы признательны за помощь сотрудникам лабораторий Индийского института технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Silveira F. A., Gama E. M., Dixon K. W., and Cross A. T.** Avoiding tailings dam collapses requires governance, partnership and responsibility, *J. Biodiversity and Conservation*, 2019, Vol. 28, No. 7. — P. 1933–1934.
2. **Wu T. and Qin J.** Experimental study of a tailings impoundment dam failure due to overtopping, *J. Mine Water and the Environment*, 2018, Vol. 37, No. 2. — P. 272–280.
3. **Davies M. P.** Tailings impoundment failures are geotechnical engineers listening, *J. Geotech. News Vancouver*, 2002, Vol. 20, No. 3. — P. 31–36.
4. **Norton P. J.** Groundwater problems in surface coal mining in Scotland, *J. Mine Water*, 1982, Vol. 1, No. 1. — P. 17–24.
5. **Libicki J.** Changes in the groundwater due to surface mining, *J. Mine Water*, 1982, Vol. 1, No. 1. — P. 25–30.
6. **Yan Z. L., Wang J. J., and Chai H. J.** Influence of water level fluctuation on phreatic line in silty soil model slope, *J. Eng. Geol.*, 2010, Vol. 113, No. 1–4. — P. 90–98.
7. **Mironenko V. and Strelsky F.** Hydrogeomechanical problems in mining, *J. Mine Water and the Environment*, 1993, Vol. 12, No. 1. — P. 35–40.
8. **Fraile del Río J.** Hydrogeological model of aitik mine using leapfrog geo software, Dissertation, Luleå University of Technology, 2015.
9. **Pak A. and Nabipour M.** Numerical study of the effects of drainage systems on saturated, Unsaturated Seepage and Stability of Tailings Dams, *J. Mine Water and the Environment*, 2017, Vol. 36, No. 3. — P. 341–355.
10. **Schnellmann R., Busslinger M., Schneider H. R., and Rahardjo H.** Effect of rising water table in an unsaturated slope, *J. Eng. Geol.*, 2010, Vol. 114, No. 1–2. — P. 71–83.
11. **Rahardjo H., Nio A. S., Leong E. C., and Song N. Y.** Effects of groundwater table position and soil properties, *J. Geotech. and Geoenvironmental Eng.*, 2010, Vol. 136, No. 11. — P. 1555–1564.
12. **Johansson J.** Impact of water-level variations on slope stability, Dissertation, Luleå Tekniska Universitet, 2014.
13. **Tesarik D. R. and Kealy C. D.** Estimating horizontal drain design by the finite-element and finite-difference methods, *J. Mine Water*, 1984, Vol. 3, No. 3. — P. 1–18.
14. **Kealy C. D. and Williams R. E.** Flow through a tailings pond embankment, *J. Water Resources Res.*, 1971, Vol. 7, No. 1. — P. 143–154.
15. **Reed S. M. and Singh R. N.** Groundwater recovery problems associated with opencast mine backfills in the United Kingdom, *J. Mine Water*, 1986, Vol. 5, No. 2. — P. 47–73.
16. **Vutukuri V. S. and Singh R. N.** Mine inundation-case histories, *J. Mine Water and the Environment*, 1995, Vol. 14, No. 1. — P. 107–130.
17. **Mandzic H.** Mine water risk in open pit slope stability, *J. Mine Water and the Environment*, 1992, Vol. 11, No. 4. — P. 35–42.

18. **Brawner C. O.** Control of groundwater in surface mining, *J. Mine Water*, 1982, Vol. 1, No. 1. — P. 1–16.
19. **Upadhyay O. P., Sharma D. K., and Singh D. P.** Factors affecting stability of waste dumps in mines, *J. Surface Min., Reclamation and Environment*, 1990, Vol. 4, No. 3. — P. 95–99.
20. **Haber S. and Mauri R.** Boundary conditions for Darcy's flow through porous media, *J. Multiphase Flow.*, 1983, Vol. 9, No. 5. — P. 561–574.
21. **Reddi L. N.** Seepage in soils: principles and applications, John Wiley & Sons, 2003.
22. **Osuji S. O. and Adegbemileke S. A.** Phreatic line and pore pressure stresses in zoned rock fill dam, *Asian J. Sci. Tech.*, 2015, Vol. 6, No. 5. — P. 1447–1454.
23. **Wooding R. A. and Chapman T. G.** Groundwater flow over a sloping impermeable layer: Application of the Dupuit–Forchheimer assumption, *J. Geoph. Res.*, 1966, Vol. 71, No. 12. — P. 2895–2902.
24. **Kovács G.** Seepage hydraulics, Elsevier, 2011, Vol. 10.
25. **Youngs E. G.** An examination of computed steady-state water-table heights in unconfined aquifers: Dupuit–Forchheimer estimates and exact analytical results, *J. Hydrology*, 1990, Vol. 119, No. 1–4. — P. 201–214.
26. **Stephenson D. J.** Rockfill in hydraulic engineering, Elsevier, 1979, Vol. 27.
27. **Irzooki R. H. and Jamel A. A. J.** Experimental study of characteristics of top seepage line through homogenous earth dam using Hele-Shaw model, *Int. J. Rev. of Civ. Eng.*, 2012, Vol. 3, No. 6. — P. 480.
28. **Fredlund D. G. and Rahardjo H.** Soil mechanics for unsaturated soil, John Wiley & Sons, 1993.
29. **Smith G. N. S.** Elements of soil mechanics, John Wiley & Sons, 1988.
30. **Jia G. W., Zhan T. L. T., Chen Y. M., and Fredlund D. G.** Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels, *J. Eng. Geol.*, 2009, Vol. 106, No. 1–2. — P. 92–103.
31. **Chapuis R. P. and Aubertin M.** A simplified method to estimate saturated and unsaturated seepage through dikes under steady-state conditions, *Canadian Geotech. J.*, 2002, Vol. 38, No. 6. — P. 1321–1328.
32. **Neuman S. P. and Witherspoon P. A.** Finite element method of analyzing steady seepage with a free surface, *J. Water Resources Res.*, 1970, Vol. 6, No. 3. — P. 889–897.
33. **Sun G., Yang Y., Cheng S., and Zheng H.** Phreatic line calculation and stability analysis of slopes under the combined effect of reservoir water level fluctuations and rainfall, *Canadian Geotech. J.*, 2016, Vol. 54, No. 5. — P. 631–645.
34. **Bardet J. P. and Tobita T.** A practical method for solving free-surface seepage problems, *J. Computers and Geotech.*, 2002, Vol. 29, No. 6. — P. 451–475.
35. **Pham H. T., Oo H. Z., and Jing C.** Stability of slope and seepage analysis in earth dam using numerical finite element model, *J. Study Civ. Eng. Arch.*, 2013, Vol. 2. — P. 104–108.
36. **Papagianakis A. T. and Fredlund D. G.** A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils, *Canadian Geotech. J.*, 1984, Vol. 21, No. 3. — P. 419–430.
37. **Song Z., Ma T., and Zhao Z.** Stability analysis of tailing dam based on Geo-studio, *Int. Conf. on Architectural, Civil and Hydraulics Eng.*, Atlantis Press, 2015.
38. **Huanga Ganghai and Hao Wang A. C. A.** Dam phreatic line simulation on FLAC 3D: a case study, *J. App. Mech. and Materials*, 2013, Vol. 356. — P. 407–410.
39. **Giglou A. N., Giglou T. N., and Minaei A.** Seepage through earth dam, *Life Sci. J.*, 2013, Vol. 10, No. 2.
40. **Geoslope International**, Seepage Modeling with SEEP/W, Geostudio Helpfile, 2010.

*Поступила в редакцию 06/IX 2019
После доработки 08/IX 2019
Принята к публикации 29/V 2020*