

ленность, прогноз поиска решений для смягчения этих проблем довольно хороший.

### **Литература**

1. Плакс, А. В. Системы управления электрическим подвижным составом / А. В. Плакс. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
2. Заболотный, Н. Г. Электрические аппараты электровозов постоянного и переменного тока / Н. Г. Заболотный. – М.: Маршрут, 2005. – 36 с.
3. Ривкин, Г. А. Преобразовательное устройство / Г. А. Ривкин. – М: Энергия, 1970. – 544 с.
4. Розанов, Ю. К. Основы силовой преобразовательной техники / Ю. К. Розанов. – М: Энергия. 1979. – 392 с.

УДК 627.82:628.16.067

### **Теоретические и экспериментальные исследования неуставившейся фильтрации в грунтовых плотинах**

Файзиев Х., Рахимов Ш. А., Жураев К. Т.

Ташкентский архитектурно-строительный институт  
Ташкент, Республика Узбекистан

*В статье приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований неуставившейся фильтрации в грунтовых плотинах при снижении уровня воды в водохранилище. Даны результаты решения данной нестационарной задачи методом конечных разностей и их сравнение с экспериментальными методами.*

С точки зрения устойчивости плотин из малопроницаемых грунтов наибольшую опасность представляют обводненные откосы верховых упорных призм грунтовых плотин в случаях быстрого снижения (сработки) горизонта воды верхнего бьефа. В практике эксплуатации водохранилищных гидроузлов такие случаи нередки и, как правило, вызываются условиями неравномерной загрузки ГЭС, периодическим забором воды в деривационные системы, предупредительной сработкой водохранилища, различными аварийными ситуациями и т. п.

Указанные обстоятельства приводят в плотинах рассматриваемого вида к существенному отставанию депрессионной поверхности фильтрационного потока от уровня воды верхнего бьефа и как следствие, к появлению опасных гидродинамических давлений воды, направленных в верховых упорных призмах в сторону водохранилища, неучет которых в расчете может привести к нарушению устойчивости откосов.

Задача неустановившейся фильтрации является одной из наиболее сложных в области теории фильтрации. Впервые общие уравнения неустановившейся фильтрации были предложены Н. Е. Жуковским [1], но решение их чрезвычайно сложно и поэтому в общем виде они пока не нашли практического применения.

Упрощенный вывод уравнения неустановившейся фильтрации был предложен Й. Буссинеском [2].

При горизонтальном водоупоре и постоянном коэффициенте фильтрации среды нелинейно уравнение Буссинеска для одномерной задачи принимает следующий вид [2]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K_t}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $h$  – гидродинамический напор;  $x$  – абсцисса точки кривой депрессии;  $t$  – текущее время;  $K_t$ ,  $\mu$  – коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта, соответственно.

Решения уравнение Буссинеска нами была осуществлено методом конечных разностей. Результаты решения были опубликованы ранее [3]. При этом уравнения (1) рассматриваются вместе со следующими начальными и граничными условиями:

$$h|_{t=0} = h_{cp}, \quad (2)$$

$$(1 - \alpha_1) \left( h(0, t) \Big|_{x=0} - h_{cp} \right) + \alpha_1 \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$(1 - \alpha_2) \left( h(L, t) \Big|_{x=L} - h_{cp} \right) + \alpha_2 \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad (4)$$

где  $h_{cp}$  – средний гидродинамический напор,  $x$  и  $t$  – переменные величины;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – параметры, принимающие значения ноль или 1 для граничных условий 1-го и 2-го рода, соответственно. Условия (1)–(4) называются краевыми задачами математической физики.

Уравнение (1) с приведенными начальными граничными условиями (2)–(4) решено методом конечных разностей. Были рассмотрены однородные грунтовые плотины без дренажа и с дренажной призмой и трубчатым дренажем с непроницаемым и проницаемым основанием. Составлена программа расчета неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах на языках C# и получено свидетельство об официальной регистрации про-

граммы в агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

В целях проверки обоснованности принятых предпосылок при выводе зависимостей для фильтрационного расчета грунтовых плотин и оценки точности полученных решений были проведены экспериментальные исследования комбинированными методами с использованием физического и физико-математического моделирования некоторых видов плотин.

Физическое моделирование проводилось на грунтовых моделях в большом металлическом грунтовом лотке размером  $0,8 \times 0,12 \times 4,0$  м<sup>3</sup> с прозрачной одной стороной из стекла.

Физико-математическое моделирование схем фильтрации проводилось на сплошных электрических моделях из электропроводной бумаги на интеграторе ЭГДА 9/60.

Исследования моделей области фильтрации в грунтовом лотке приближаются к натурным условиям работы плотин. В данном случае исследования грунтовых моделей являлись предварительными, цель которых заключалась в получении недостающих граничных условий таких, как действительное положение кривой депрессии и высоты, выкачивания воды на верховой откос при сработке уровня воды, для дальнейшего моделирования и решения задач неустановившейся фильтрации на электрических моделях методом ЭГДА.

Модель плотины в грунтовом лотке для принята с постоянным заложением откосов 1:4 по профилю подобной Чардаринской. Для исследований был привезен барханный песок. Из него формировались грунтовые модели плотины и берегового массива. Грунт в лоток укладывался послойно с трамбованием, влажностью 4 % и плотностью  $1,5$  т/м<sup>3</sup>.

Моделирование неустановившейся фильтрации для плотины на сплошных электрических моделях отличается от решения стационарных задач лишь тем, что необходимо учитывать время процесса. Наиболее удобно и проще решать задачи такого рода дискретном представлении процесса во времени. Методика моделирования подробно разработана В. М. Шестаковым [4]. В нашем случае решение задачи упрощено тем, что не приходится искать поверхность депрессии на конечный момент времени путем приближения. Эта задача на электрических моделях довольно сложна и грубо приближена. Положение поверхностей депрессии как недостающее граничное условие для каждого расчетного случая с нами приняты по результатам исследований в большом грунтовом лотке.

Возможности разработанной методики, программы расчета неустановившейся фильтрации и оценка достоверности получаемых результатов иллюстрируются ниже на примере фильтрационных задач.

Расчет неустановившейся фильтрации однородных плотин с трубчатым дренажем, схема которой показана на рис., выполняем при следующих начальных и граничных условиях.

Определение участка высачивания фильтрационного потока производим по методу В. М. Шестакова [5]. В качестве объекта для этой задачи рассматривалась однородная плотина с трубчатым дренажем при следующих параметрах: высота плотины 17,0 м; заложение верхового откоса  $m = 4$ ; заложении низового откоса  $m = 3$ ; начальная глубина воды верхнего бьефа  $H_1 = 15$  м.

Результаты решения данной нестационарной задачи методом конечных разностей и их сравнение с экспериментальными методами на различные моменты времени и соответствующие им уровни верхнего бьефа представлены на рис. Как видно, результаты, полученные с помощью МКР достаточно точно совпадают с результатами экспериментов выполненных на физических и физико-математических моделях. Расхождения в отметках депрессионной поверхности в расчетных сечениях не превосходят допустимых пределов. Это позволяет утверждать об обоснованности выбранных расчетных схем и принятых исходных допущений в численных исследованиях.

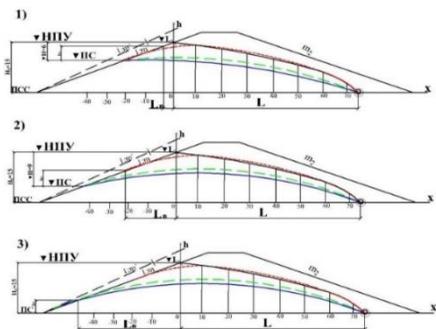


Рис. Результаты расчетов неустановившейся фильтрации в однородной грунтовой плотине с трубчатым дренажем:

- 1 – на момент времени 40 суток после начала сработки водохранилища;
- 2 – на момент времени 60 суток после начала сработки водохранилища;
- 3 – на момент времени 100 суток после начала сработки водохранилища;
- — — — положение депрессионной поверхности по МКР;
- \_\_\_\_\_ положение депрессионной поверхности по эксперименту

Положения депрессионной кривой в момент времени  $t = 0$  определяем по формуле

$$h = \sqrt{2 \frac{q}{kt} (L - x + L_d)}. \quad (5)$$

При  $x = -m_1^1 \vartheta t$ ,  $h = h_1 = H_1 - \vartheta t$ ; при  $x = L$ ,  $h = 0$ .

Полученные решения позволяют проследить динамику изменений положения депрессионной поверхности, градиентов и скоростей фильтрационного потока, происходящих при сработке водохранилища.

Используемый метод конечных разностей позволяет получить подробную картину изменения положения депрессионной кривой, фильтрационных градиентов и скоростей при снижении уровня воды водохранилища. Это необходимо для оценки фильтрационной прочности элементов грунтовых плотин и проверки устойчивости их откосов.

### Литература

1. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В. И. Аравин, С. Н. Нумеров. – М.: Гостехиздат, 1953. – 616 с.
2. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
3. Файзиев, Х. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах методом конечных разностей / Х. Файзиев, С. Бабакаев, М. Норматов // Известия вузов: строительство. – 2016. – № 1. – С. 43–51.
4. Лукнер, Л. Моделирование геофильтрации / Л. Лукнер, В. М. Шестаков. – М.: Недра, 1976. – 407 с.
5. Шестаков, В. М. Определение гидродинамических сил в земляных сооружениях и откосах при падении уровней в бьефах / В. М. Шестаков // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. – 1956. – № 2. – С. 98–128.

УДК 626.35

### Экспериментальные исследования конструкции крепления земляных каналов

Яковлев Е. А., Синиченков А. П., Михалькевич Д. Д.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*На основании проведенных испытаний конструкции бокового крепления земляных каналов польдерных мелиоративных систем получено сни-*  
298