

doi: 10.5862/MCE.48.4

## Оценка эффективности дренажных и противofильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС)

*Д.т.н., старший научный сотрудник С.В. Сольский,  
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»;  
к.г.-м.н., начальник отдела О.И. Новицкая,  
ОАО «Атомэнергопроект»;  
начальник отдела С.В. Кубетов,  
ООО «НПК Проектводстрой»*

**Аннотация.** Предложенная авторами методика позволяет оценить степень эффективности работы отдельных элементов гидротехнических сооружений, выполняющих схожие функции и работающих совместно, а также определить влияние их текущего состояния на работоспособность всего сооружения в целом.

Методика отработывалась для отдельной оценки работы дренажных и противofильтрационных элементов оснований бетонных плотин на скальном основании при их совместной работе. Для реализации поставленной задачи авторы использовали метод численного моделирования и данные натурных наблюдений, которые позволили откалибровать геofильтрационную модель. Методика апробирована на примере одного из створов Бурейской ГЭС, где была выполнена оценка степени влияния эффективности дренажных и противofильтрационных мероприятий на величину фofильтрационного противодавления на бетонное основание плотины.

По результатам исследований сформулированы предложения по назначению соответствующих критериев К1 и К2. Следует отметить, что разработанная авторами методика позволяет выделить приоритеты при определении состава и объема мероприятий по ремонтам и/или реконструкции элементов гидротехнических сооружений.

**Ключевые слова:** дренажные устройства; противofильтрационная завеса; эффективность работы; оценка влияния; критерии безопасности; бетонные плотины

### Введение

В современных условиях обеспечению безопасности крупных промышленных и энергетических объектов, в т. ч. и гидротехнических сооружений гидроэлектростанций, уделяется большое внимание. В соответствии с энергетической стратегией России на период до 2030 года [1] одной из основных целей развития электроэнергетики является обеспечение надежности и безопасности работы системы электроснабжения России в нормальных и чрезвычайных ситуациях. Также в соответствии с данной стратегией государственная политика предполагает осуществление технического и технологического контроля и надзора за соблюдением требований безопасности при использовании возобновляемых источников энергии.

В настоящее время для обеспечения и контроля эксплуатационной безопасности гидротехнических сооружений ГЭС в соответствии с нормативными и методическими документами выделяются два уровня критериев безопасности: К1, соответствующий условиям нормальной эксплуатации ГЭС, и К2, соответствующий условиям предельного (предавварийного) состояния ГЭС. Согласно нормативным и методическим документам [2–4] установление критериев безопасности заключается в назначении количественных и качественных контролируемых показателей. Как правило, для эксплуатируемых гидроэнергетических объектов при установлении количественных значений используются материалы проекта и данные многолетних натурных наблюдений, позволяющие по результатам регрессионного анализа определить диапазоны изменения контролируемых параметров. При разработке критериев безопасности для гидротехнических сооружений рассматриваются пограничные состояния всего сооружения в целом по принципу «надежное (работоспособное) эксплуатационное состояние – предаварийное (предельное) эксплуатационное состояние». Однако иногда возникает необходимость оценить степень эффективности работы отдельных элементов ГЭС, выполняющих схожие функции и

Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В. Оценка эффективности дренажных и противofильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС)

работающих совместно, а также определить влияние их текущего состояния на работоспособность всего сооружения [5–8].

В качестве примера рассмотрим противofильтрационные (ПФУ) и дренажные устройства (ДУ) бетонных плотин на скальном основании, эффективность работы которых, как правило, оценивается опосредованно через величину противодавления, а также по отдельным показателям их работы, сложившихся в процессе эксплуатации – в первую очередь это дренажные расходы ( $Q$ ) и пьезометрические напоры ( $H$ ). Однако эти показатели характеризуют эффективность работы противofильтрационных и дренажных устройств лишь косвенно. В связи с этим актуальной представляется задача оценить по отдельности вклад каждого из этих устройств в обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения во всем диапазоне их потенциальной работоспособности.

В данной статье представлены результаты оценки эффективности совместного и раздельного действия противofильтрационных и дренажных устройств бетонных плотин на скальном основании на примере Бурейской ГЭС.

### Обзор литературы

Методы и способы оценки эффективности дренажа достаточно широко освещены в материалах различных авторов. Как правило, при исследованиях мелиоративного дренажа в гумидной и аридной зонах применяются методы, основанные на сопоставлении проектной / идеальной водопримной способности дренажа с фактической, полученной по данным натурных наблюдений. В практике оценок эффективности действия дренажа имеются предложения, позволяющие всесторонне характеризовать ее (как для неустановившегося, так и для установившегося режима) рядом коэффициентов, таких как коэффициент эффективности по водопримной способности к дрене  $Q$ , коэффициент эффективности по положению депрессионной поверхности и коэффициент эффективности по времени изменения положения депрессионной поверхности [9–12]. Однако при оценке работы дренажных систем ГЭС и гидроэнергетических объектов данные коэффициенты практически не используются [13, 14].

В исследованиях авторов в области изучения фильтрационных потоков приводятся теоретические решения для схем фильтрации под плотиной, учитывающие степень несовершенства завесы и режим эксплуатации дренажа [15, 16]. В частности, С.Н. Нумеровым опубликовано решение для горизонтального напорного пласта, перекрытого несовершенной полупроницаемой диафрагмой [17]. Л.Н. Павловская для более общего случая приводит решение, полученное методом последовательного фрагментирования [18]. В большинстве теоретических решений рассматривается горизонтальный изотропный однородный пласт с вертикальным расположением непроницаемой завесы и дренажа. В частности, Л.Н. Павловской по методу электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) получены зависимости характеристик эффективности работы дренажа на противодавление бетонных ГЭС для случаев его наличия или полной неработоспособности.

В научных трудах института гидротехники им. Б.Е. Веденеева начиная с 70-х годов прошлого века публиковались материалы, посвященные исследованиям конструктивных особенностей подземного контура плотин. В состав наиболее распространенной конструкции подземного контура бетонной плотины входит инъекционная завеса и глубокий дренаж. В основном методом ЭГДА на сплошных и дискретных средах выполнялись оценка и сравнение влияния дренажа и цементационной завесы на характеристики фильтрационного потока [19, 20], исследовалось также влияние на фильтрационное давление анизотропии фильтрационных свойств основания плотины [21]. Для оценки целесообразности, в том числе и технико-экономической, устройства инъекционной завесы выполнялись расчеты для предельных состояний элементов подземного контура (исправная или полностью нарушенная инъекционная завеса [22]), исследовалось влияние геометрических размеров элементов подземного контура – несовершенство цементационной завесы и наличие укрепительной цементации [23], режим эксплуатации дренажных устройств. Отдельным направлением исследований является изучение влияния напряженно-деформированного состояния массива на его водопроницаемость [20, 22].

Сведения об эффективности совместного действия противofильтрационных и дренажных устройств бетонных плотин на скальном основании в полном диапазоне изменения их характеристик и разработке на основе ее анализа соответствующих критериев безопасности в специальной литературе отсутствуют.

В настоящее время разработан современный математический аппарат, базирующийся на численных методах, позволяющий провести подробный анализ фильтрационного режима основания ГЭС в полном диапазоне изменения работоспособности защитных элементов фактически при любых условиях неоднородности, анизотропности вмещающей среды и конфигурации как области фильтрации, так и местоположения соответствующих граничных условий [24–33].

Авторами статьи исследованы промежуточные состояния во всем диапазоне эффективности как отдельной, так и совместной работы дренажа и противofильтрационных устройств.

### Постановка задачи

На основании вышеизложенного ставилась задача разработать методику оценки эффективности дренажных и противofильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании, в рамках которой предполагалось:

- ввести коэффициенты эффективности действия дренажных и противofильтрационных устройств;
- разработать алгоритм определения величины противодействия на подошву бетонной плотины с отдельным и совместным учетом эффективности дренажных и противofильтрационных устройств;
- выполнить апробацию методики по предложенному алгоритму на примере одного из створов Бурейской ГЭС и дать предложения по назначению соответствующих критериев безопасности.

### Описание исследования

Для оценки эффективности дренажных и противofильтрационных элементов оснований бетонных плотин предложена система коэффициентов эффективности:

- коэффициент эффективности дренажного устройства  $\eta_{дрен}$ , определяемый как отношение его фактической водоприемной способности к его максимально возможной в данных конкретных гидрогеодинамических условиях водоприемной способности:

$$\eta_{дрен} = \frac{Q_{факт}}{Q_{макс}} \cdot 100 \%,$$

где  $Q_{факт}$  – фактическая на момент оценки водоприемная способность дренажа;  $Q_{макс}$  – максимальная водоприемная способность дренажа;

- коэффициент эффективности противofильтрационной (цементационной) завесы  $\eta_{нфз}$ , определяемый как отношение ее фактической водопроницаемости к водопроницаемости, заложенной в проекте:

$$\eta_{нфз} = \frac{K_{ф факт}}{K_{ф проект}} \cdot 100 \%,$$

где  $K_{ф факт}$  – фактическая на момент оценки водопроницаемость (коэффициент фильтрации) ПФУ;  $K_{ф проект}$  – проектная водопроницаемость ПФУ.

Алгоритм определения величины противодействия на подошву бетонной плотины с учетом эффективности дренажных и противofильтрационных устройств заключается в следующем.

1. На основе анализа проектных данных инженерно-геологических изысканий, исполнительной документации, результатов натурных наблюдений и специальных исследований уточняются фильтрационные характеристики основания плотины и фактическая проницаемость противofильтрационной завесы на момент оценки.

2. Фактическая водоприемная способность дренажного устройства определяется по данным натурных наблюдений и/или специальных опытно-фильтрационных исследований как приточность к нему на момент оценки.

Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В. Оценка эффективности дренажных и противofильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС)

3. По результатам анализа гидрогеодинамической обстановки в системе плотина – основание, представительности сети пьезометров, наличия ряда натуральных наблюдений и т. п. выделяются контрольные створы, пригодные для оценки состояния дренажных и противofильтрационных устройств.

4. Для каждого из выделенных контрольных створов на основе имеющихся данных строятся фofильтрационные модели (в общем случае пространственные, в частном случае профильные), которые калибруются по данным натуральных наблюдений за уровнями (напорами) и расходами.

5. Выполняются вариантыные расчеты геofильтрационного режима и соответствующих гидрогеодинамических характеристик фofильтрационного потока при различной степени водоприемной способности дренажного устройства и проницаемости ПФУ.

6. На созданных и откалиброванных фofильтрационных моделях для дренажного устройства определяется его максимальная (идеальная) водоприемная способность, т. е. максимально возможный в данных условиях дренажный расход.

7. Определяется проектное значение величины проницаемости противofильтрационного устройства.

8. Коэффициент эффективности дренажного устройства  $\eta_{дрен}$  вычисляется как отношение фofактической водоприемной способности к максимально возможной водоприемной способности дренажного устройства, а коэффициент эффективности противofильтрационного устройства, например цементационной завесы,  $\eta_{пфз}$  вычисляется как отношение ее фofактической проницаемости к заложенной в проекте.

9. По данным о фofактическом положении напоров в системе бетонная плотина – основание для каждого контрольного створа вычисляются соответствующие критериальные значения K1 и K2 для величины противодавления на подошву бетонной плотины, которые сравниваются с их проектными значениями.

10. Аналогично для отдельно рассчитанных полей напоров, в зависимости от рассмотренного диапазона эффективности ПФУ и ДУ, вычисляются фиктивные значения величин противодавления. Для их визуального представления строятся номограммы противодавлений в осях: значение соотношения проектного противодавления ПФУ и фofактического – расстояние по подошве от верхнего бьефа (ВБ) к нижнему бьефу (НБ), и соотношение максимального противодавления ДУ и фofактического – расстояние по подошве от ВБ к НБ. По ним определяются критериальные значения для дренажных K1д и K2д и противofильтрационных K1п и K2п устройств и соответствующие им коэффициенты эффективности.

11. В зависимости от конкретных критериальных значений коэффициентов эффективности дренажных и противofильтрационных устройств определяются состав и регламент управляющих эксплуатационных воздействий.

12. По доле вклада дренажных и противofильтрационных устройств в обеспечение устойчивости бетонной плотины могут быть оценены критерии и приоритеты при определении в случае необходимости состава и объема мероприятий по ремонтам и/или реконструкции.

Метод, который использовался для оценки эффективности дренажной и противofильтрационной завес, – численное моделирование. Одним из значительных преимуществ этого метода является возможность виртуального отключения и подключения различных элементов изучаемой системы, в данном случае – геofильтрационной. Выбор метода численного моделирования для анализа и прогноза гидродинамических процессов, развивающихся при фofильтрации через основание бетонной плотины, обусловлен сложностью протекающих здесь геofильтрационных процессов. Эти процессы определяют уровенный режим в пьезометрах и градиенты потока подземных вод, условия формирования водоприотков в дренажную систему и в конечном счете влияют на устойчивость гидротехнического сооружения через величину взвешивающего противодавления.

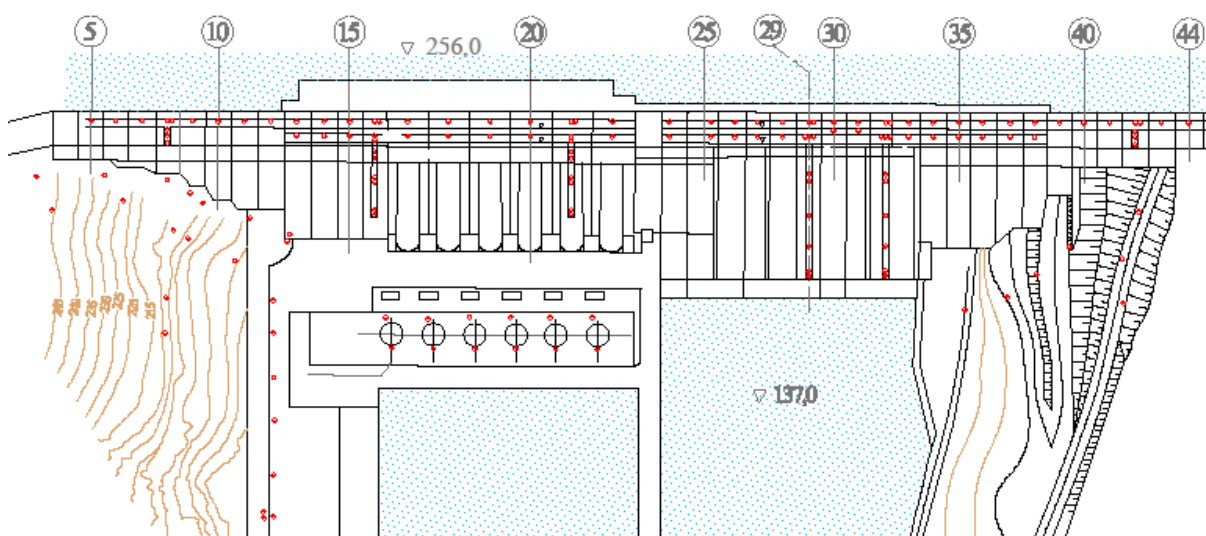
В данной постановке задачи принимается, что фofильтрационные свойства основания – его проницаемость – нам известны, так как существует множество способов их оценки, начиная от анализа данных геологоразведки и инженерных изысканий и заканчивая анализом данных натуральных наблюдений статистическими, аналитическими и теми же численными методами. Обычно комбинация названных методов позволяет оценить фofильтрационные свойства пород с точностью, достаточной для решения инженерных задач.

Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В. Оценка эффективности дренажных и противofильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС)

Фактическая эффективность дренажных и противофильтрационных элементов гидротехнического сооружения оценивается путем анализа поля напоров и дренажных расходов на момент оценки, максимальная эффективность противофильтрационного устройства и максимальная водопримная способность дренажа определяются с применением численного моделирования.

Апробация методики оценки эффективности дренажных и противофильтрационных элементов бетонных плотин на скальном основании проведена на примере Бурейской ГЭС.

При разработке численной геофильтрационной модели основания бетонной плотины гравитационного типа за основу были взяты характеристики секции 29 водосбросной части плотины Бурейской ГЭС. Выбор обусловлен наличием обширного материала натуральных наблюдений (в секции 29 находится один из контрольных створов), а также геологическими и гидрогеологическими условиями, характерными в целом для бетонных плотин на скальном основании. На рисунке 1, построенном по материалам предыдущих исследований, видно, что секция 29 расположена на участке с плано-параллельным характером фильтрационного потока и содержит достаточное количество работоспособных пьезометров для калибровки модели.

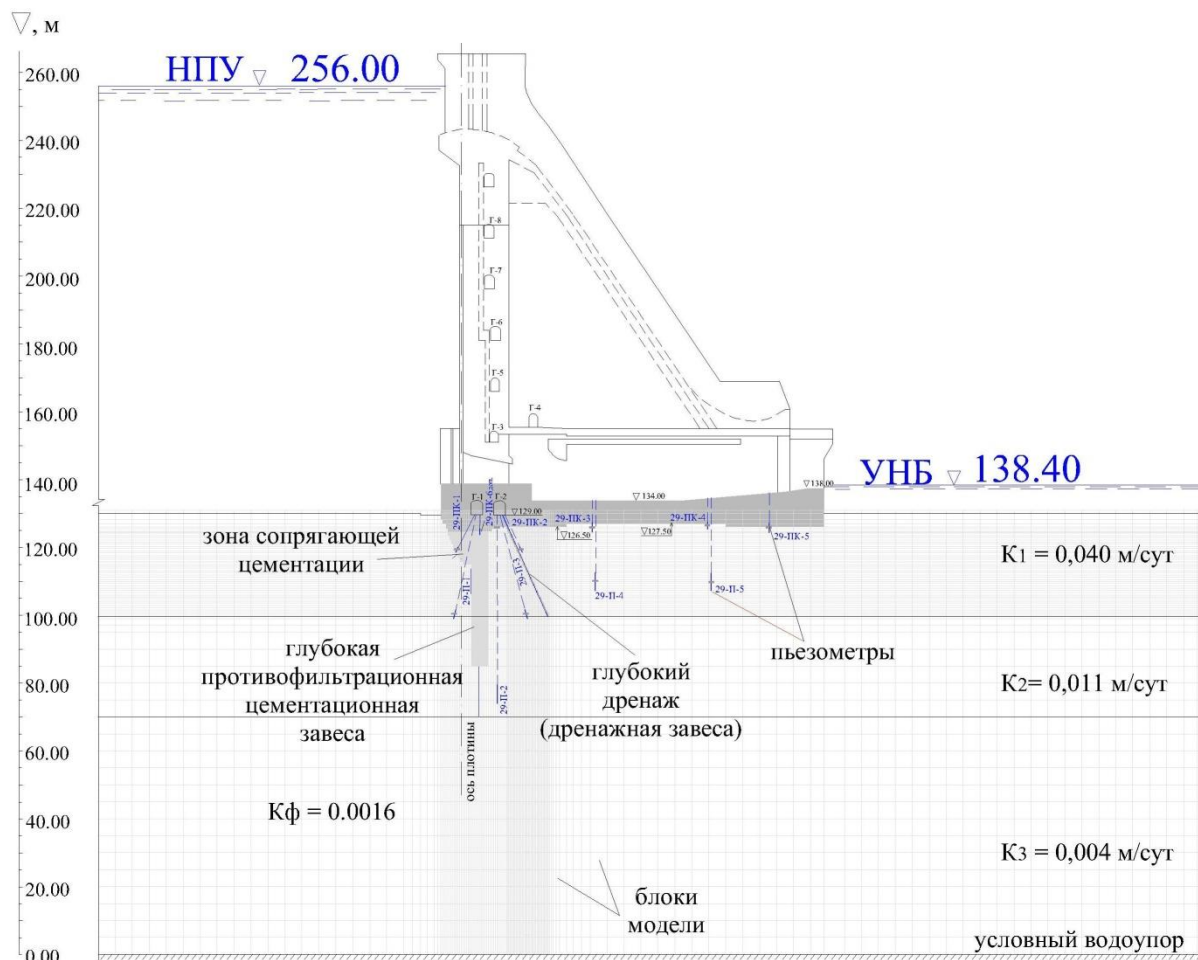


**Рисунок 1. Общая схема расположения створов и пьезометров Бурейской ГЭС**

Для реализации геофильтрационной конечно-разностной модели водовмещающего массива использовался программный комплекс Visual MODFLOW ver.4.4 [34, 35], в основе которого лежит программа моделирования USGS MODFLOW, разработанная Геологической службой США. Программный комплекс предназначен для решения широкого спектра гидрогеологических задач, связанных с прогнозом течения подземных вод в многослойных системах. Он позволяет решать задачи в стационарной и нестационарной постановке и моделировать как напорную, так и безнапорную фильтрацию, а также моделировать работу дренажных систем.

Структура модели определялась гидрогеологическим строением основания плотины и конструктивными особенностями ГТС (рис. 2). Верификация модели выполнялась по данным натуральных наблюдений за уровнями в пьезометрах и расходами дренажных скважин.





**Рисунок 2. Схема численной модели секции 29 водосбросной части плотины Бурейской ГЭС**

На основании разработанной геофильтрационной модели в профильной постановке был выполнен цикл численных экспериментов с целью оценки влияния состояния противофильтрационных и дренажных элементов на величину противодействия высоконапорной плотины на скальном трещиноватом основании.

Для получения результатов, охватывающих полный диапазон изменений коэффициентов эффективности противофильтрационных устройств ( $\eta_{нфз}$ ) и вертикального дренажа ( $\eta_{дрен}$ ), для каждого случая нами был разработан план эксперимента [36], в котором оказались охваченными все интересующие нас расчетные случаи, приведенные в таблице.

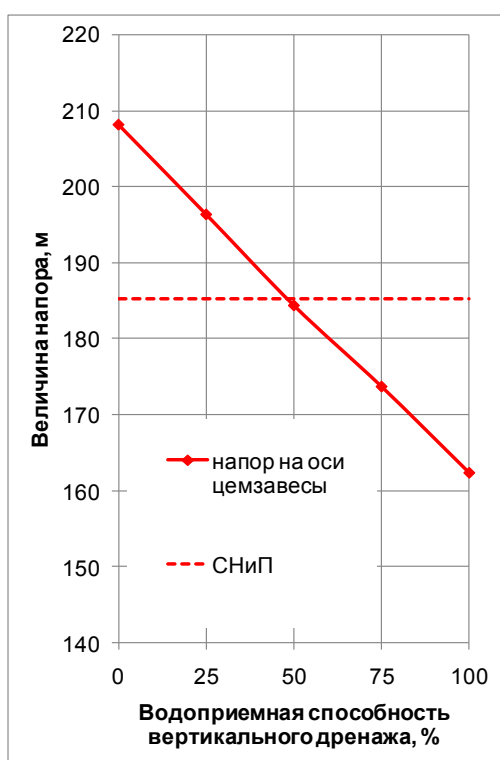
**Таблица. Степени эффективности противофильтрационной завесы и вертикального дренажа, рассмотренные при планировании эксперимента**

Степень эффективности, %		вертикального дренажа, $\eta_{дрен}$				
		0	25	50	75	100
противофильтрационной завесы, $\eta_{нфз}$	0	+	+	+	+	+
	25	+	+	+	+	+
	50	+	+	+	+	+
	75	+	+	+	+	+
	100	+	+	+	+	+

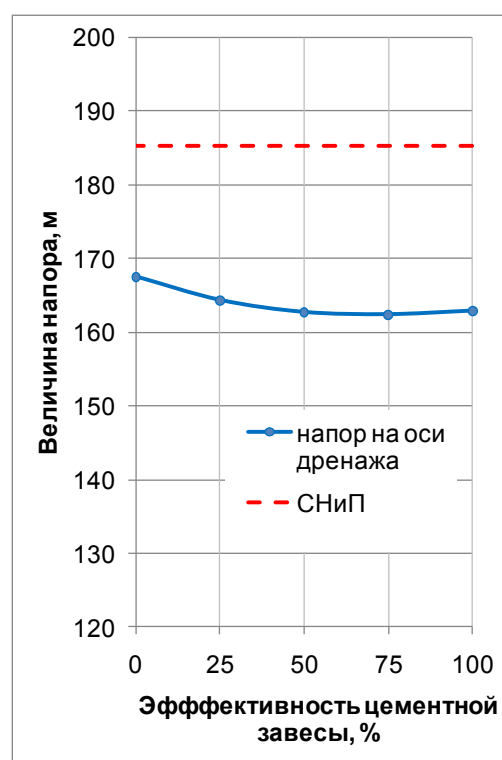
Численные эксперименты запланированы и проведены тремя сериями:

- 1) изменение водоприемной способности дрены от нулевой до значения, обеспечивающего максимально возможный расход;
- 2) изменение проницаемости ПФЗ от проектной до полной деградации (коэффициент фильтрации равен проницаемости окружающих горных пород);
- 3) исследование различных комбинаций эффективности цементационной завесы и дренажа при их совместном функционировании.

В экспериментах исследовались характер и закономерность зависимости напоров под подошвой плотины и расходов потока от исследуемого параметра в пределах заданного диапазона. В качестве условно предельного принято противодействие, величина которого соответствует эпюре распределения давления фильтрационного потока по подошве согласно рекомендациям СНиП. Коэффициенты эффективности дренажных и противофильтрационных мероприятий были рассчитаны в виде относительных величин в диапазоне от 0 до 100 %. Для иллюстрации результатов в соответствии со СНиПом выбраны две контрольные точки, находящиеся на оси цементационной завесы и дренажного ряда. Результаты счетных экспериментов представлены на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3. Зависимость напора (противодавления) от водоприемной способности дренажа в контрольной точке, расположенной на оси цементационной завесы**



**Рисунок 4. Зависимость напора (противодавления) от проницаемости вертикальной цементационной завесы в контрольной точке, расположенной на оси вертикального дренажа**

Результаты анализа эффективности отдельного и совместного функционирования защитных элементов приведены также для ряда промежуточных значений в соответствии с планом эксперимента (см. таблицу): 0, 25, 50, 75 и 100 % эффективности. В абсолютных значениях коэффициент фильтрации цемзавесы менялся от 0,04 до 0,0001 м/сут, проводимость блоков с модулем дрена – от  $10^{-5}$  до 1,0 м<sup>2</sup>/сут. Результаты расчетов представлены на рисунках 5–7, иллюстрирующих, что при одновременном снижении параметров эффективности защитного действия вертикального дренажа и цемзавесы допустимые значения противодействия на основании ГТС наблюдаются при эффективности защитных мероприятий не менее 50–60 %.

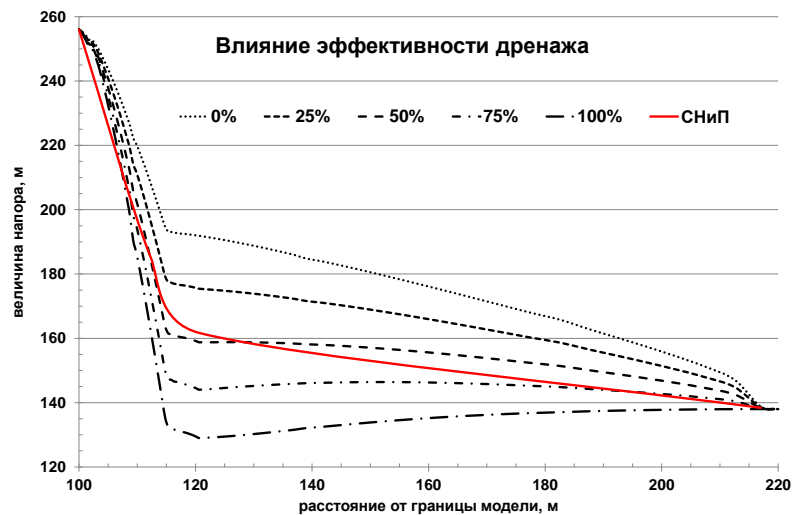


Рисунок 5. Распределение напоров в основании ГТС при различной степени эффективности вертикального дренажа ( $H=f(\eta_{дрен})$ )

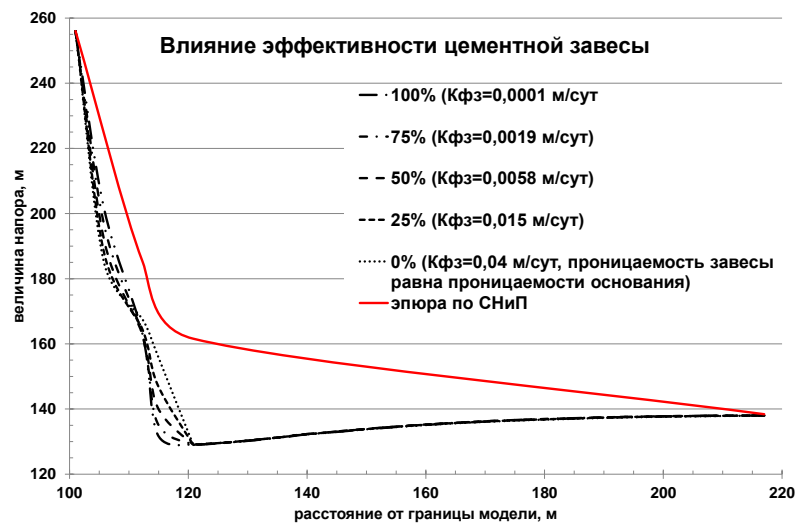


Рисунок 6. Распределение напоров в основании ГТС при различной степени эффективности цементзавесы ( $H=f(\eta_{нфз})$ )

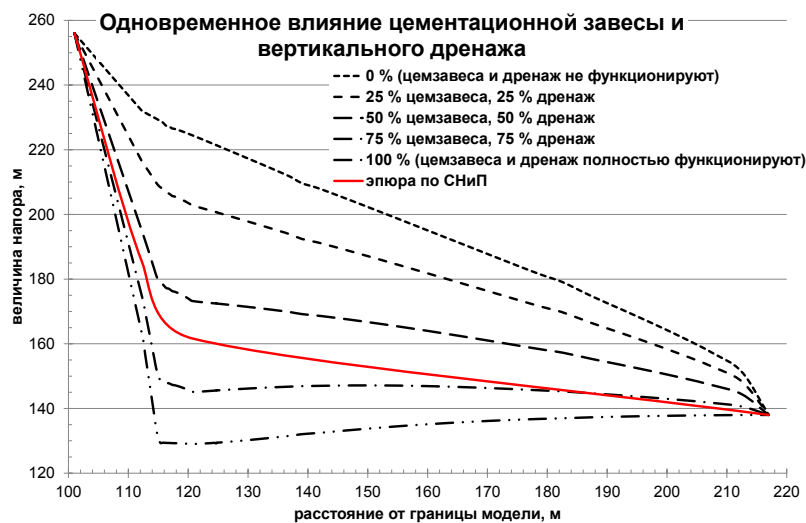


Рисунок 7. Распределение напоров в основании ГТС при различной степени эффективности вертикального дренажа и цементзавесы ( $H = f(\eta_{нфз}, \eta_{дрен})$ )

Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В. Оценка эффективности дренажных и прогнитофильтрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС)



Для оценки совместной работы дренажа и ПФУ по результатам вариантного моделирования разработаны графические зависимости, по которым можно определять значения  $\eta_{дрен}$  и  $\eta_{пфз}$  во всем диапазоне их эффективности (от 0 до 100 %) при одновременной работе этих элементов подземного контура бетонной плотины.

Таким образом, в рамках проведенных исследований выполнена оценка степени влияния эффективности дренажных и противофильтрационных мероприятий на величину фильтрационного противодействия на бетонное основание плотины как по отдельности, так и совместно для полного ряда состояний защитных устройств. Прогнозные графики, полученные в результате анализа оценок состояния дренажа и ПФУ, предлагается использовать в качестве прогнозных математических моделей показателей состояния ГТС. Так, из полученных графиков для данного сечения видно, что влияние противофильтрационной завесы во всем диапазоне значений эффективности (от 0 до 100 %) не превышает допустимой величины противодействия при условии полной работоспособности дренажа. В связи с чем выделение критериев K1 и K2 отдельно для противофильтрационной завесы не целесообразно. При этом из графика видно, что для вертикального дренажа критическим (превышающим величину допустимого противодействия) значением эффективности работы является уже 50 % при полной работоспособности противофильтрационной завесы. Следовательно, для эффективности дренажа можно выделить критерии безопасности K1 = 75 % и K2 = 60 %.

Также следует отметить, что разработанная авторами методика позволяет выделить приоритеты при определении состава и объема мероприятий по ремонтам и/или реконструкции элементов гидротехнических сооружений и сделать ранее используемые подходы (опытная оценка, финансовые критерии, экономическая целесообразность) [37] более взвешенными и обоснованными.

### Выводы

1. Разработана методика отдельной оценки эффективности дренажных и противофильтрационных элементов оснований бетонных плотин при их совместной работе, использующая систему коэффициентов эффективности противофильтрационной и дренажной завес и охватывающая не только пограничные условия функционирования защитных элементов, но и полный диапазон изменения их работоспособности от 0 до 100 %.

2. Применение предложенной методики проиллюстрировано на примере секции 29 водосбросной плотины Бурейской ГЭС. Анализ результатов выполненных исследований подтверждает сделанный ранее вывод о преобладающем влиянии дренажной завесы на обеспечение допустимого противофильтрационного давления на подошву ГТС. В частности отмечено, что при условии определяющего значения дренажной завесы Бурейской ГЭС:

- с точки зрения обеспечения безопасной эксплуатации ГТС недопустимо снижение коэффициента эффективности дренажа ниже 50 %; совместное применение дренажа и цементационной завесы повышает эффективность защитных мероприятий в целом;
- при коэффициенте эффективности дренажа более 85 % противодействие на подошву ГТС остается в пределах допустимых значений даже при полной деградации цементной завесы.

3. Даны рекомендации по назначению значений критериев безопасности K1 и K2 для эффективности работы дренажных и противофильтрационных устройств для данного сечения.

### Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1715-р от 13 ноября 2009. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года».
2. Федеральный закон РФ «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997. №117-ФЗ.
3. Инструкция о порядке определения критериев безопасности и оценки состояния ГТС накопителей жидких промышленных отходов на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и в организациях. Утв. постановлением №1 Госгортехнадзора России от 04.02.2002.

4. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений, РАО «ЕЭС России». М., 2000.
5. Risk Assessment as an Aid to Dam Safety Management. Rev. No. 9, ICOLD, 24.08.99.
6. Li T., Sun L., Zhao L. Research on Reasonable Selection of Strength on Concrete Dam Safety Evaluation // Earth and Space. 2012. Pp. 944–953.
7. Scott G. The Practical Application of Risk Assessment to Dam Safety // Geo-Risk 2011. Pp. 129–168.
8. Кубетов С.В. Вероятностная оценка надежности отдельных элементов дренажной системы // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014. Т. 270. С. 18–25.
9. Даишев Т.И., Бишоф Э.А. и др. Справочник по эксплуатации мелиоративных систем Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Агропромиздат. Ленинградское отд., 1987. 263 с.
10. Мясков А.В., Гуревич А.И., Плавник Ю.М., Пшеничников В.А. Исследование водоприемной способности бестраншейного дренажа с фильтрующими элементами и влияние механического кольматажа на качество и надежность осушительной регулирующей сети // Вопросы проектирования бестраншейного дренажа: Труды СевНИИГиМ. Ленинград, 1982. С. 3–27.
11. Сольский С.В. Обоснование параметров дренажных конструкций с учетом неоднородностей в придренированной зоне: Автореф. дисс....канд. техн. наук. СПб, 1992. 13 с.
12. Rashed A., El-Sayed E. Simulating Agricultural Drainage Water Reuse Using QUAL2K Model: Case Study of the Ismailia Canal Catchment Area, Egypt // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2014. Vol. 140(5). 05014001.
13. ВСН 045-72. Указания по проектированию дренажа подземных гидротехнических сооружений // Гидропроект им. С.Я. Жука. М., 1973. С. 63–65.
14. Сольский С.В. Основные технические решения по ремонту и реконструкции дренажа грунтовых плотин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2004. Т. 243. С. 193–203.
15. Bouwer H. Infiltration of water into nonuniform soil // Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division. 1969. Vol. 95. No. IR4. Pp. 451–462.
16. Lehr J.H. Ground water movement // Journal American Water Works Association. 1969. Vol. 60. No. 3. Pp. 281–285.
17. Нумеров С.Н., Панасенко Л.А. О фильтрации грунтовых вод в горизонтальном напорном пласте, перекрытом несовершенной полупроницаемой диафрагмой // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1981. Т. 146. С. 13–21.
18. Павловская Л.Н. Расчет фильтрации под бетонной плотиной с завесой и глубоким дренажом в основании // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1981. Т. 146. С. 31–38
19. Павловская Л.Н. О методике обоснования возможности отказа от устройства цементационной завесы в скальном основании бетонной плотины // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1977. Т. 117. С. 95–101.
20. Павловская Л.Н., Кветная И.А. Особенности фильтрации в теле и основании высокой грунтовой плотины и эффективность противотрационной завесы // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1979. Т. 135. С. 27–34.
21. Павловская Л.Н., Фомина Н.Е. Влияние анизотропии скального основания бетонной плотины на фильтрационное давление // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1988. Т. 209. С. 9–13.
22. Павловская Л.Н., Александров М.Г., Сапегин Д.Д. Сопоставление фактических и расчетных фильтрационных характеристик в скальном основании бетонной плотины (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2008. Т. 235. С. 95–103.
23. Павловская Л.Н. Противодействие на подошву бетонной плотины на скальном основании // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1996. Т. 231. С. 119–125.
24. Норватов Ю.А., Петрова И.Б., Норватова О.И., Степанова А.С. Прогноз гидродинамического режима при затоплении шахты им. С.М. Кирова на Ленинградском месторождении горючих сланцев // Сб. «Вопросы гидрогеологии и гидрогеомеханики горного производства». СПб.: ВНИИМИ, 1998. С. 113-118.
25. Норватов Ю.А., Петрова И.Б., Норватова О.И. Оптимизация гидрогеологических исследований при разведке и эксплуатации угольных месторождений на базе компьютерных технологий // Сб. «Ресурсный потенциал твердых полезных ископаемых на рубеже XXI века». ВНИИГРИУголь, Ростов-на-Дону, 2001. С. 132-137.

Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В. Оценка эффективности дренажных и противотрационных устройств бетонных плотин на скальном основании (на примере Бурейской ГЭС)

26. Норватова О.И. Методика прогноза гидрогеологических условий затопления угольных шахт на базе численного моделирования геофильтрационных процессов (на примере Восточного Донбасса): Автореф. дисс...канд. техн. наук. СПб., 2005. 23 с.
27. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1988. 228 с.
28. Штофф В.А. Роль моделей в познании. Ленинград: ЛГУ, 1963. 126 с.
29. Ramm D., Chazan D. A mixed numerical analytical method for groundwater flow simulation // Water Resources Research. 1980. Vol. 16. No. 5. Pp. 871–880.
30. Zhong D.-H., Li M.-C., Song L.-G., Wang G. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoenvironmental applications: An example from the Jinping first-level hydropower engineering project, China // Computers & Geosciences. 2006. Vol. 32(9). Pp. 1270–1282.
31. Trescott P.C., Pinder G.F., Larson S. P. Finite-difference Model for Aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments // Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 7. Washington, United States Government Printing Office, 1976. 116 p.
32. Narasimhan T. Numerical Modeling in Hydrogeology // Recent Trends in Hydrogeology. 1982. Special paper No. 189. Geological Society of America, Boulder, Colorado. Pp. 273–296.
33. Remson J., Hornberger G., Molz F. Numerical Methods in Subsurface Hydrology. New-York: Wiley Interscience, 1971. 389 p.
34. Norvatov Y.A., Petrova I.B., Norvatova O.I., Tugarov I.V. Usage of numerical modeling for the analysis and forecast of technological regime of underground water in flooded mines // International Mining Conference 2010 – Advanced Mining for Sustainable Development, 23–25 September 2010. Halong, Vietnam. Pp. 105–109.
35. Hill M. C. MODFLOW/P - A computer program for estimating parameters of a transient, three-dimensional, groundwater flow model using nonlinear regression // U.S. Geological Survey, Open-file report 91-484. Denver, Colorado, 1992. 358 p.
36. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
37. Воробьева Н.Н., Лопатина М.Г., Кубетов С.В. Проектирование реконструкции вертикального дренажа водосливной плотины Камской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 254. С. 107–113.

*Станислав Викторович Сольский, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(921)9643605; эл. почта: solsky@yandex.ru*

*Оксана Игоревна Новицкая, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(921)7896521; эл. почта: o\_novickaja@so2.spbaer.ru*

*Станислав Васильевич Кубетов, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(921)5744448; эл. почта: skubetov@proektvodstroi.ru*

© Сольский С.В., Новицкая О.И., Кубетов С.В., 2014

doi: 10.5862/MCE.48.4

## Evaluating the effectiveness of drainage and impervious elements of concrete dams on bedrock (on example of Bureyskaya HPP)

**S.V. Solsky***“B.E. Vedeneev VNIIG” JSC, Saint-Petersburg, Russia  
+79219643605; e-mail: solsky@yandex.ru***O.I. Novitskaya***“Atomenergoproekt” JSC, Saint-Petersburg, Russia  
+79217896521; e-mail: o\_novickaja@so2.spbaep.ru***S.V. Kubetov***“NPK Proektvodstroj” LLC, Saint-Petersburg, Russia  
+79215744448; e-mail: skubetov@proektvodstroj.ru*

### Key words

drainage; grout curtain; efficiency; impact estimation; safety criteria; concrete dams

### Abstract

The proposed technique allows estimating the efficiency of individual elements of hydraulic structures that perform similar functions and work together, and determining the impact of their current state on the entire structure performance.

The technique was elaborated for a separate evaluation of drainage and impervious elements of bases of concrete dams on bedrock when they work together. To implement this task, the authors used the method of numerical simulation (modeling) and comparisons with field observations data, which allowed calibrating the ground model.

The technique was tested on one of the gates at Bureyskaya HPP, and the influence of drainage and impervious elements effectiveness upon the backpressure on the base of the concrete dam was estimated. The result of these studies allows the authors to suggest appropriate safety criteria K1 and K2. It should be noted that the developed technique allows giving priorities in determining the composition and volume of the repair and / or reconstruction of hydraulic structures elements.

### References

1. *Rasporyazheniye Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 1715-r ot 13 noyabrya 2009. «Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda»* [Russian Federation Government Decree № 1715-r of November 13, 2009. "Energy Strategy of Russia for the period up to 2030"]. (rus)
2. *Federalnyy zakon RF «O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy» ot 21.07.1997. № 117-FZ* [Federal Law "On the safety of hydraulic structures" of 21.07.1997. No. 117-FZ]. (rus)
3. *Instruktsiya o poryadke opredeleniya kriteriyev bezopasnosti i otsenki sostoyaniya GTS nakopiteley zhidkikh promyshlennykh otkhodov na podnadzornykh Gosgortekhnadzoru Rossii proizvodstvakh, obyektakh i v organizatsiyakh. Utv. postanovleniyem Gosgortekhnadzora Rossii ot 04.02.2002. №1* [Instructions on the procedure for determining the safety criteria and assessment of hydraulic structure's storage of liquid industrial waste on the facilities and organizations subject under supervision of Gosgortekhnadzor of Russia. Approved by Resolution No. 1 of Gosgortekhnadzor of Russia from 04.02.2002]. (rus)
4. *Metodika opredeleniya kriteriyev bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy, RAO «YeES Rossii»* [Methods of determining the criteria for dam safety, RAO "UES Russia"]. Moscow, 2000. (rus)
5. *Risk Assessment as an Aid to Dam Safety Management. Rev. No. 9, ICOLD, 24.08.99.*
6. Li T., Sun L., Zhao L. Research on Reasonable Selection of Strength on Concrete Dam Safety Evaluation. Research on Reasonable Selection of Strength on Concrete Dam Safety Evaluation. *Earth and Space*. 2012. Pp. 944–953.
7. Scott G. The Practical Application of Risk Assessment to Dam Safety. *Geo-Risk*. 2011. Pp. 129–168.
8. Kubetov S.V. Veroyatnostnaya otsenka nadezhnosti otdelnykh elementov drenazhnoy sistemy [Probabilistic assessment of the reliability of the individual elements of the drainage system]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 2014. Vol. 270. Pp. 18–25 (rus)

Solsky S.V., Novitskaya O.I., Kubetov S.V. Evaluating the effectiveness of drainage and impervious elements of concrete dams on bedrock (on example of Bureyskaya HPP)

9. Daishev T.I., Bishof E.A. [et al]. *Spravochnik po ekspluatatsii meliorativnykh sistem Nechernozemnoy zony RSFSR* [Operations Handbook reclamation systems of non-chernozem area of the RSFSR]. Leningrad: Agropromizdat. Leningradskoye otd., 1987. 263 p. (rus)
10. Myaskov A.V., Gurevich A.I., Plavnik Yu.M., Pshenichnikov V.A. Issledovaniye vodopriyemnoy sposobnosti bestransheynogo drenazha s filtruyushchimi elementami i vliyaniye mekhanicheskogo kolmatazha na kachestvo i nadezhnost osushitelnoy reguliruyushchey seti [Study of drainage capacity of water intake trenchless with the filter elements and the influence of mechanical colmatage on the quality and reliability of the regulatory network of drainage]. *Voprosy proyektirovaniya bestransheynogo drenazha: Trudy SevNIIGiM* [Problems of trenchless drainage design: Proceedings of SevNIIGiM]. Leningrad, 1982. Pp. 3–27. (rus)
11. Solskiy S.V. *Obosnovaniye parametrov drenazhnykh konstruksiy s uchetom neodnorodnostey v pridrennoy zone* [Justification of drainage structures' parameters with inhomogeneities in the blind drain area]. PhD thesis. Saint-Petersburg, 1992. 13 p. (rus)
12. Rashed A., El-Sayed E. Simulating Agricultural Drainage Water Reuse Using QUAL2K Model: Case Study of the Ismailia Canal Catchment Area, Egypt. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2014. Vol. 140(5). 05014001.
13. VSN 045-72. *Ukazaniya po proyektirovaniyu drenazha podzemnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Departmental building codes 045-72. Guidelines for the design of underground drainage waterworks]. Gidropekt im. S.Ya. Zhuka. Moscow, 1973. Pp. 63–65. (rus)
14. Solskiy S.V. Osnovnyye tekhnicheskiye resheniya po remontu i rekonstruktsii drenazha gruntovykh plotin [Main technical solutions for the repair and reconstruction of drainage of ground water dams]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 2004. Vol. 243. Pp. 193–203. (rus)
15. Bouwer H. Infiltration of water into nonuniform soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1969. Vol. 95. No. IR4. Pp. 451–462.
16. Lehr J.H. Ground water movement. *Journal American Water Works Association*. 1969. Vol. 60. No. 3. Pp. 281–285.
17. Numerov S.N., Panasenko L.A. O filtratsii gruntovykh vod v gorizontalmom napornom plaste, perekrytom nesovershennoy polupronitsayemoy diafragmoy [On the filtration of groundwater in horizontal confined aquifer, overlapped imperfect semi-permeable diaphragm]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 1981. Vol. 146. Pp. 13–21. (rus)
18. Pavlovskaya L.N. Raschet filtratsii pod betonnoy plotinoy s zavesoy i glubokim drenazhom v osnovanii [Calculation of seepage under the concrete dam with a veil and a deep drainage in foundation]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 1981. Vol. 146. Pp. 31–38. (rus)
19. Pavlovskaya L.N. O metodike obosnovaniya vozmozhnosti otkaza ot ustroystva tsementatsionnoy zavesy v skalnom osnovanii betonnoy plotiny [On the method of study the possibility of abandoning the device cementation in the bedrock foundation of a concrete dam]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 1977. Vol. 117. Pp. 95–101. (rus)
20. Pavlovskaya L.N., Kvetnaya I.A. Osobennosti filtratsii v tele i osnovanii vysokoy gruntovoy plotiny i effektivnost protivofiltratsionnoy zavesy [Filtering features in the body and foundation of high groundwater dam and barrier efficiency]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 1979. Vol. 135. Pp. 27–34. (rus)
21. Pavlovskaya L.N., Fomina N.Ye. Vliyaniye anizotropii skalnogo osnovaniya betonnoy plotiny na filtratsionnoye davleniye [Effect of anisotropy of the rocky foundation on concrete dam on the filtration pressure]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 1988. Vol. 209. Pp. 9–13. (rus)
22. Pavlovskaya L.N., Aleksandrov M.G., Sapegin D.D. Sopostavleniye fakticheskikh i raschetnykh filtratsionnykh kharakteristik v skalnom osnovanii betonnoy plotiny (na primere plotiny Sayano-Shushenskoy GES) [Comparison of actual and estimated filtration characteristics in the bedrock of a concrete dam (in terms of Sayano-Shushenskaya HPP dam)]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 2008. Vol. 235. Pp. 95–103. (rus)
23. Pavlovskaya L.N. Protivodavleniye na podoshvu betonnoy plotiny na skalnom osnovanii [Pressure on the sole of a concrete dam on rock foundation]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 1996. Vol. 231. Pp. 119–125. (rus)
24. Norvatov Yu.A., Petrova I.B., Norvatova O.I., Stepanova A.S. Prognoz gidrodinamicheskogo rezhima pri zatopenii shakhty im. S.M.Kirova na Leningradskom mestorozhdenii goryuchikh slantsev [Forecast of hydrodynamic mode in case of flooding of S.M. Kirov mine at the Leningrad oil shale]. *Collection papers «Voprosy gidrogeologii i gidrogeomekhaniki gornogo proizvodstva»* [Collection papers "Issues of hydrogeology and hydromechanics of mining production"]. Saint-Petersburg: VNIMI, 1998. Pp. 113–118. (rus)
25. Norvatov Yu. A., Petrova I. B., Norvatova O. I. Optimizatsiya gidrogeologicheskikh issledovaniy pri razvedke i ekspluatatsii ugolnykh mestorozhdeniy na baze kompyuternykh tekhnologiy [Optimization of

Solskiy S.V., Novitskaya O.I., Kubetov S.V. Evaluating the effectiveness of drainage and impervious elements of concrete dams on bedrock (on example of Bureyskaya HPP)



- hydrogeological investigations at exploration and exploitation of coal deposits based on computer technologies]. *Sb. «Resursnyy potentsial tverdykh poleznykh iskopayemykh na rubezhe XXI veka»* [Collection papers "Resource potential of solid minerals at the turn of the XXI century"]. VNIGRIugol, Rostov-na-Donu, 2001. Pp. 132–137. (rus)
26. Norvatova O.I. *Metodika prognoza gidrogeologicheskikh usloviy zatopeniya ugolnykh shakht na baze chislennogo modelirovaniya geofiltratsionnykh protsessov (na primere Vostochnogo Donbassa)* [Forecasting technique hydrogeological conditions of flooding of coal mines on the basis of numerical simulation geofiltrational processes (for example, the Eastern Donbass)]. Abstract of PhD thesis. Saint-Petersburg, 2005. 23 p. (rus)
  27. Lomakin Ye.A., Mironenko V.A., Shestakov V.M. *Chislennoye modelirovaniye geofiltratsii* [Numerical simulation geofiltration]. Moscow: Nedra, 1988. 228 p. (rus)
  28. Shtoff V.A. *Rol modeley v poznanii* [Role of the models in the knowledge]. Leningrad: LGU, 1963. 126 p. (rus)
  29. Ramm D., Chazan D. A mixed numerical analytical method for groundwater flow simulation. *Water Resources Research*. 1980. Vol. 16. No. 5. Pp. 871–880.
  30. Zhong D.-H., Li M.-C., Song L.-G., Wang G. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoenvironmental applications: An example from the Jinping first-level hydropower engineering project, China. *Computers & Geosciences*. 2006. Vol. 32(9). Pp. 1270–1282.
  31. Trescott P.C., Pinder G.F., Larson S.P. Finite-difference Model for Aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 7*. Washington, United States Government Printing Office, 1976. 116 p.
  32. Narasimhan T. Numerical Modeling in Hydrogeology. *Recent Trends in Hydrogeology*. 1982. Special paper No. 189. Geological Society of America, Boulder, Colorado. Pp. 273–296.
  33. Remson J., Hornberger G., Molz F. *Numerical Methods in Subsurface Hydrology*. New-York: Wiley Interscience, 1971. 389 p.
  34. Norvatov U.A., Petrova I.B., Norvatova O.I., Tugarov I.V. Usage of numerical modeling for the analysis and forecast of technological regime of underground water in flooded mines. *International Mining Conference 2010 – Advanced Mining for Sustainable Development, 23–25 September 2010*. Ha Long, Vietnam. Pp. 105–109.
  35. Hill M.C. MODFLOW/P - A computer program for estimating parameters of a transient, three-dimensional, groundwater flow model using nonlinear regression. *U.S. Geological Survey, Open-file report 91–484*. Denver, Colorado, 1992. 358 p.
  36. Adler Yu.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 280 p. (rus)
  37. Vorobyeva N.N., Lopatina M.G., Kubetov S.V. *Proyektirovaniye rekonstruktsii vertikalnogo drenazha vodoslivnoy plotiny Kamskoy GES* [Designing vertical reconstruction drainage spillway dam at the Kama HPP]. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedenevaya*. 2009. Vol. 254. Pp. 107–113. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 28–38**