УДК 627.8:519.6

**Н.А. Анискин, А.С. Антонов,
Ю.Б. Мгалобелов*,
А.В. Дейнеко***

*ФГБОУ ВПО «МГСУ»,
*ОАО «Институт
Гидропроект»*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА ОСНОВАНИЙ ВЫСОКИХ ПЛОТИН НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Дан анализ существующих методик математического моделирования фильтрационного режима оснований высоких плотин на основе применения метода конечных элементов. Рассмотрены потенциально возможные причины нарушения фильтрационного режима, а также соответствующие приемы расчетного прогнозирования параметров нештатного развития фильтрационных процессов.

Ключевые слова: фильтрация, высокие плотины, математические модели, метод конечных элементов, моделирование.

Важным вопросом инженерной безопасности высоких плотин является обоснование фильтрационного режима системы плотина — основание [1]. В большинстве случаев нарушение фильтрационного режима провоцирует отклонения от нормальной работы сооружения [2—4].

Для решения фильтрационных задач используются различные методы [5, 6]. В настоящее время наибольшее распространение по-

**N.A. Aniskin, A.S. Antonov,
Yu.B. Mgalobelov*, A.V. Deyneko***

*MGSU,
JSC "Institute Hydroproject"

STUDYING THE FILTRATION MODE OF LARGE DAMS' FOUNDATIONS ON MATHEMATICAL MODELS

The essential issue of engineering safety of high dams is substantiation of the seepage conditions of the dam — foundation system. In most cases, a violation of the filtration mode leads to disruption of the hydraulic structure.

The authors analyzed the methods of mathematical simulation of a filtration mode for large dams' foundations basing on finite element method. Up-to-date computational capability permits solving seepage problems in 3D transient formulation. The possible reasons for filtration mode disturbance in foundations of large dams are observed, as well as the corresponding methods of analytical forecasting for the parameters of inappropriate development of filtration processes.

Application of the universal industrial-strength software complexes makes it possible to combine on a single software platform the seepage modeling with other methods of design-basis validation of hydraulic structures, such as computations of stress-strain state, strength and stability of the dam — foundation system.

The analysis results should be further used in the calculation of the stress strain state of the structures.

Key words: filtration, high dams, mathematical models, finite element method, simulation.

The essential issue of engineering safety of high dams is substantiation of the seepage conditions of the dam — foundation system [1]. In most cases, a violation of the filtration mode leads to disruption of the hydraulic structure [2—4].

Different methods are used for solving seepage problems [5, 6]. At present the

лучило математическое моделирование методом конечных элементов [7—14]. Современные вычислительные возможности позволяют решать задачи фильтрации в пространственной нестационарной постановке [15].

Основное дифференциальное уравнение неустановившейся фильтрации в пространственной постановке записывается в виде уравнения Пуассона [16]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] - \mu \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где K_x, K_y, K_z — коэффициенты фильтрации (по направлению координатных осей); $H = f(x, y, z, t)$ — искомая напорная функция в расчетной области, изменяющаяся во времени t ; μ — коэффициент водоотдачи грунта.

Решение дифференциального уравнения Пуассона может быть найдено различными математическими методами: минимизацией некоторого специально подобранного функционала [17]; назначением граничных условий по трем направлениям; сведением уравнения (1) к решению трех одномерных дифференциальных уравнений.

Однако данный способ решения реализован в ограниченном кругу расчетных программных комплексов, которые в большинстве случаев не позволяют проводить решение совместных задач, вследствие чего приходится прибегать к всевозможным аналогиям.

Одной из самых популярных является температурная аналогия, в которой решение задачи фильтрации базируется на использовании дифференциального уравнения теории теплопроводности [18]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_y \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_z \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0, \quad (2)$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — коэффициенты теплопроводности материала (по направлению координатных осей); $t = t(x, y, z, \tau)$ — искомая температурная функция; τ — время.

mathematical modeling with the use of the finite element method became mostly widespread [7—14]. Up-to-date computational capability permits solving seepage problems in 3D transient formulation [15].

The main differential equation of the unsteady seepage flow in 3D formulation is written in the form of Poisson's equation [16]:

where K_x, K_y, K_z — seepage coefficients (by coordinate axes directions); $H = f(x, y, z, t)$ — sought time-dependent head function in the design domain t ; μ — water yield factor.

The Poisson's equation may be solved by different mathematical methods: minimization of a certain specially selected functional [17]; assignment of boundary conditions by three directions; reduction of the equation (1) to solving three one-dimensional differential equations.

However, this method is implemented in a few universal computational software systems that do not allow for a solution of simultaneous tasks, because of what is necessary to apply the analogy.

Popular is the temperature analogy, solution of the seepage problem is based on application of the differential equation of the thermal conductivity theory [18]:

where $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — coefficients of material thermal conductivity (by coordinate axes directions); $t = t(x, y, z, \tau)$ — the sought-for temperature function; τ — time.

Из сопоставления уравнений (1) и (2) следует, что коэффициенты теплопроводности материала аналогичны коэффициентам фильтрации; температура в каждой точке эквивалентна напору, а теплота — расходу.

В современной практике для решения задачи расчетного обоснования фильтрационного режима проектируемых сооружений в ряде случаев выбирается метод температурной аналогии, который может быть реализован во многих универсальных промышленных программных комплексах конечно-элементного моделирования, например на платформе ANSYS Mechanical APDL (США) [19—22].

Применение универсальных промышленных программных комплексов позволяет совмещать на одной программной платформе фильтрационное моделирование с другими видами расчетного обоснования гидротехнических сооружений, такими как расчеты напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости системы плотина — основание [23]. Это дает возможность эффективно решать совместные задачи, предполагающие передачу результатов одного вида расчетов в расчеты другого вида (термонапряженное состояние, тепломассоперенос, влияние объемных фильтрационных сил и т.п.). Такие программные платформы совместимы с концепцией управления жизненным циклом проекта (Project Lifecycle Management, PLM), что предоставляет широкие возможности создания постоянно-действующих моделей и повышения эффективности использования результатов расчетов, например, в рамках мониторинга или для разработки критериев безопасности.

As ensues from the comparison of equations (1) and (2), the material thermal conductivity coefficients are similar to seepage coefficients; the temperature at each point is equivalent to the head, whereas the heat — to the discharge.

In modern practice the problem of the design validation of seepage conditions of the would-be structures in some cases may be solved by method of temperature analogue, which can be applied in many universal industrial-strength software complexes of the finite element modeling, for instance on the basis of ANSYS Mechanical APDL (USA) [19—22].

Application of the universal industrial-strength software complexes makes it possible to combine on a single software platform the seepage modeling with other methods of design-basis validation of hydraulic structures, such as computations of stress-strain state, strength and stability of the dam — foundation system [23]. This makes it possible to solve the inter-disciplinary problems, which involve transfer of the results of one type computations into the other type computations (thermal stress conditions, heat and mass transfer, impact of volume seepage forces, etc.). Such software platforms are compatible with the concept of the project lifecycle management (PLM), which offers wide range of opportunities for development of the continuously usable models and upgrading the effectiveness of the computational results usage, for instance within the frames of monitoring or for development of the safety criteria.

The industrial-strength software complexes are advantageous from the viewpoint of supporting the computational procedure on the graphics processors, which contributes

К преимуществам промышленных программных комплексов следует отнести поддержку технологии расчетов на графических процессорах, которая позволяет ускорить расчеты на обычных персональных компьютерах за счет использования общей оперативной памяти и значительного параллелизма [24]. Графические процессоры основаны на многоядерной архитектуре, и их быстродействие с учетом параллельных вычислений в последние годы значительно превышает быстродействие обычных центральных процессоров. В настоящее время видеокарты с программно-аппаратной архитектурой параллельных вычислений CUDA (первая версия которой вышла в 2007 г.) получили большое распространение, что делает технологию легко доступной для инженерных работ. Исследования показывают значительный эффект от перехода к параллельным вычислениям: в задачах механики упруго-пластического тела удается достигнуть 200-кратного ускорения расчетов.

Определение параметров фильтрационного потока в масштабе основания высокой плотины в большинстве случаев производится по результатам решения пространственной стационарной задачи в неоднородной изотропной среде. В данной работе приводятся результаты создания математической модели фильтрации в основании высокой плотины, анализ дренажного расхода и распределение пьезометрических напоров. Для изучения фильтрационного режима была разработана пространственная математическая геофильтрационная модель основания и противофильтрационных элементов плотины размером в плане порядка 8 км². Мощность учитываемого слоя основания назначается с учетом распределения фильтрационных свойств грунтов на изученную глубину. Характерная мощность основания в 8 раз больше

to speeding up the computations on the common personal computers due to application of the common RAM and substantial parallelism [24]. The graphics processors are based on multi-core architecture and taking into account the parallel computations their speed in recent years greatly exceeds the speed of common central processors. At present the video cards with software and hardware architecture of parallel computations CUDA (the first version of which was made in 2007) became widespread, which makes the technology easily accessible to engineering works. The studies show the significant effect at transfer to the parallel computations: it is possible to reach 200-fold acceleration of the computations in the problems of elastic-plastic body mechanics.

In this paper we present the results of creating a mathematical model of the filtration at the base of the High Dam and the analysis of the drainage flow and the distribution of piezometric heads. As a rule, the seepage flow parameters within the scope of high dam foundation are determined by the results of the dimensional steady-state problem solution in the non-uniform isotropic environ.

For studying the seepage conditions the 3D mathematical geo-seepage model of the dam foundation and seepage-control facilities, approximately 8 km² in size in plan, is developed. The thickness of the considered foundation layer is assigned with due consideration for distribution of the soil seepage properties over the studied depth. The representative thickness of the foundation is 8 times as much as the

глубины противофильтрационных мероприятий (противофильтрационная завеса, дренажи), т.е. в среднем 400 м.

Полученная геофильтрационная модель аппроксимировалась конечно-элементной сеткой (рис. 1), размерность которой определяется имеющимися вычислительными возможностями. Для решения задачи на современных персональных компьютерах разрабатываются сетки основного массива грунта, ориентировочно до 4...5 млн конечных элементов в виде тетраэдров и гексаэдров 1-го порядка, либо из 1,5...2 млн элементов 2-го порядка. При указанных масштабах модели это позволяет получить средний объем конечного элемента на уровне от 600 до 2000 м³, что дает базовую длину ребра элемента порядка 8...17 м для элементов 1-го порядка и 13...26 м для элементов 2-го порядка, в зависимости от вида аппроксимации. Для получения более подробного решения в пределах известной зоны противофильтрационных мероприятий необходимо сгущение сетки конечных элементов, в результате чего средний объем конечного элемента уменьшается и составляет порядка 15 м³ с базовой длиной ребра 1...5 м.

Указанные средние размеры конечных элементов велики для моделирования противофильтрационных элементов сооружения. Большое внимание необходимо уделить оптимизации и качеству проработки сетки, чтобы получить достаточную дискретность математической модели в местах высокого градиента результатов, таких как противофильтрационная завеса, дренаж, подошва бетонной плотины. В частности, противофильтрационную завесу, на платформе ANSYS, рекомендуется моделировать не менее чем в пять слоев конечных элементов 1-го

depth of the seepage-control facilities (grout curtain, drainage), i.e. 400 m on the average.

The obtained geo-seepage model is approximated by finite element computational grid (Fig. 1), dimensions of which are dictated mainly by the available computational capabilities. For solving the problems on the up-to-date personal computers the grids of the main soil mass are developed to approximately 4...5 million finite elements in the form of tetrahedrons and hexahedrons of the first order, or of 1.5...2 million finite elements of the second order. With the models of the above dimensions it becomes possible to obtain the average volume of the finite element of about from 600 to 2000 м³, which provides the basic length of the element edge of approximately 8...17 m for the elements of the first order and 13...26 m for the elements of the second order as may depend on the approximation type. In order to obtain more detailed solution within the known zone of seepage-control measures, the finite element grid should be made fine, which will result in decreasing of the average volume of the finite element to approximately 15 м³ with the 1...5 m basic length of the edge.

The given average dimensions of the finite elements are large for modeling of the seepage-control facilities of the structure. Much attention should be paid to optimization and quality of the computational grid design in order to obtain the adequate discreteness of the mathematical model at the places of high gradients, such as grout curtain, drainage, concrete dam foot. In particular, in ANSYS the grout curtain is recommended to simulate in at least of 5 layers of finite elements of the first order or in 3 layers of the

порядка или в три слоя элементов 2-го порядка. Предпочтение следует отдавать регулярной топологии сетки и элементам в форме гексаэдров.

elements of the second order. The preference should be given to the grid regular topology and the elements in the form of hexahedrons.

Рис. 1. Конечно-элементная аппроксимация объемной геофильтрационной модели основания высокой плотины

Fig. 1. Finite element approximation of 3D geo-seepage model of high dam foundation

Калибровка пространственной геофильтрационной модели выполнялась на основе данных натурных наблюдений (показания пьезометров, расходы на дренажах и др.). Для этого выполнялись многовариантные расчеты и сравнительный анализ относительного влияния проницаемости инженерно-геологических элементов на фильтрационные процессы в масштабе всей плотины. Исходя из полученных данных рассчитывались уточненные коэффициенты фильтрации отдельных инженерно-геологических элементов и противофильтрационной завесы (рис. 2).

Расчетное прогнозирование фильтрационного режима основания (рис. 3) выполнялось с помощью откалиброванной математической модели при планомерном наполнении водохранилища. На распределение пьезометрических напоров влияла фильтрационная неоднородность грунтов, в результате которой происходило определенное перераспределение фильтрационного потока.

3D geo-seepage model is calibrated basing on the field observations data (read-outs of piezometers, drainage flows, etc.). For this purpose the multi-part analyses and comparative analyses of relative impact of geological features permeability on seepage processes of the entire dam are performed. The updated seepage coefficients of separate geological features and grout curtain are computed basing on the obtained data (Fig. 2).

The seepage conditions in foundation (Fig. 3) are predicted with use of calibrated mathematical model at deliberate reservoir impoundment. The geological and, as a result, seepage non-uniformity of the soils, which causes a certain redistribution of seepage flow, exert effect on distribution of the piezometric heads.

Рис. 2. Распределение коэффициентов фильтрации, м/сут, в основании откалброванной математической модели

Fig. 2. Distribution filter coefficient (m/day) based calibrated mathematical model

Рис. 3. Распределение пьезометрических напоров, м, в разрезе по водосбросному участку бетонной плотины

Fig. 3. Distribution of piezometric head (in meters) in the section on the site of a concrete dam spillway

Фильтрационный приток в нижний бьеф обычно на несколько порядков превосходит дренажные расходы. Поэтому он практически не зависит от работы дренажа и определяется напором и типом сооружения, а также пространственной конфигурацией и распределением фильтрационных свойств в системе плотина — основание.

Анализ проектных решений по противофильтрационным мероприятиям позволяет определить следующие сценарии, включая возможные нарушения противофильтрационных элементов, для фильтрационных расчетов в основании высоких плотин:

- 1) нормальная эксплуатация сооружения;
- 2) полный выход из строя дренажной завесы;

Commonly, the tailrace seepage inflow is several orders greater than the drainage flows. Therefore it does not depend on the drainage operation and is dictated by the head and type of the structure as well as by 3D configuration and distribution of the seepage properties in the dam — foundation system.

The analysis of the seepage-control design solutions makes it possible to determine the following scenarios for the seepage analyses in the high dam foundations:

- 1) normal operation of the structure;
- 2) total drainage failure;
- 3) partly drainage holes colmatage;

3) частичная кольматация дренажных скважин;

4) нарушение работы дренажа на отдельных участках;

5) полный выход из строя противофильтрационной завесы;

6) нарушение работы противофильтрационной завесы на отдельных участках.

Сценарий 1. Выполнялся расчет сооружения при нормальной эксплуатации всех противофильтрационных элементов конструкции, с учетом выполненной калибровки. Данный сценарий являлся исходным для сопоставления с последующими расчетами.

В качестве примера расчетов по всем сценариям была рассмотрена система плотина — основание с параметрами: дренажный расход 31,4 л/с (2710 м³/сут) и общий приток в нижний бьеф 1915 л/с (165 451 м³/сут). Уровни верхнего и нижнего бьефов во всех вариантах расчетов были постоянными и составляли соответственно 208 и 137,4 м.

Сценарий 2. Выход из строя дренажной завесы моделируется посредством прекращения работы дренажных скважин в основании плотины. В результате расчета определялись пьезометрические напоры при нарушенном фильтрационном режиме, что давало представление об эффективности работы противофильтрационной завесы. Приток в нижний бьеф увеличился, приблизительно на 1 % до 2710 л/с (167 295 м³/сут). Распределение пьезометрических напоров в основании секции бетонной плотины с наибольшим заглублением приведено на рис. 4, а.

Сценарий 3. Кольматация дренажных скважин рассматривалась как засорение дренажа частицами грунта, принесенными фильтрационной водой. Рассматривались два варианта кольматации: уменьшение глубины заложения дренажных скважин на 10 и 20 % от проектной глубины. В табл. 1 приведены полученные результаты.

4) drainage off-normal operation at separate sections;

5) total grout curtain failure;

6) disruption of curtain failure; in certain areas.

Scenario 1. Check analysis of the structure at normal operation of all seepage-control facilities considering the performed calibration is conducted. This scenario is the basic one for comparison with the further computations.

As an example of computations by all scenarios let us consider the dam — foundation system with the following parameters: drainage flow of 31.4 l/sec (2710 m³/day) and total tailrace inflow of 1915 l/sec (165 451 m³/day). The levels of the upper and the tailrace in all the variants of calculations was constant, the headbay level = 208 m and tailrace level = 137.4 m.

Scenario 2. Drainage failure is simulated by stoppage of drainage holes functioning in the dam foundation. The piezometric pressures and heads computed at abnormal seepage conditions give the idea of the grout curtain operation effectiveness. The tailrace inflow rises approximately by 1 % — up to 2710 l/sec (167 295 m³/day). The distribution of piezometric heads is shown in Fig. 4, a.

Scenario 3. The drainage holes colmatage is considered as clogging the drainage by soil particles brought by seeping water. During the operation of the structure the colmatage is inevitable. Two colmatage alternatives are considered: at 10 % and 20 % of the design depth of the drainage consistent with tab. 1.

Табл. 1. Прогнозирование дренажных расходов при кольматации скважин

Tab. 1. Prediction of drainage flows at drainage holes colmatage

Вариант	Расход Flow	Снижение расхода, % Flow decrease, %	Alternative
Проектная глубина дренажа	2709,96 м ³ /сут m ³ /day	—	Drainage design depth
	31,36 л/с l/sec	—	
Кольматирование дренажной завесы на 10 %	2594,2 м ³ /сут m ³ /day	4,3	Drainage holes colmatage by 10 %
	30,0 л/с l/sec	4,3	
Кольматирование дренажной завесы на 20 %	2554,36 м ³ /сут m ³ /day	5,7	Drainage holes colmatage by 20 %
	29,56 л/с l/sec	5,7	

Кольматация ведет к снижению расходов на дренаже в зависимости от остаточной глубины дренажа. Во время стабильной работы сооружения кольматация и вызываемое ею снижение фильтрационного расхода на дренаже обычно происходят постепенно. Поэтому диагностика этого явления должна осуществляться путем совместного мониторинга как дренажных расходов, так и пьезометрических напоров на подошву сооружения.

На рис. 4, б приведено распределение пьезометрических напоров при снижении проектной глубины дренажа на 10 %.

Сценарий 4. Нарушение работы дренажа на отдельных участках моделируется путем выключения из работы дренажных скважин под отдельными секциями. Результаты расчета дают представление о вкладе рассматриваемого участка дренажа в суммарный дренажный расход, который в данном сценарии снижается. Вместе с тем происходит увеличение дренажных расходов на соседних участках, которые частично компенсируют выключение из работы рассматриваемого участка (табл. 2).

The colmatage entails drainage flow decrease as may depend on the drainage residual depth. At stable operation of the structure the colmatage and relevant seepage flow decrease in drainage commonly occur gradually. Therefore, this phenomenon should be diagnosed by joint monitoring of drainage flows and piezometric heads on the structure foot. Fig. 4, б shows the distribution of piezometric heads at drainage design depth decrease by 10 %.

Scenario 4. Drainage off-normal operation at separate sections is simulated by disabling the group of drainage holes under separate sections. The computational results give the idea of the considered drainage section contribution into the total drainage flow, which decreases in this scenario. Along with it, the drainage flows in the adjacent areas increase, which partially compensates disabling of the considered section (Tab. 2).

Табл. 2. Прогнозирование дренажных расходов при выходе дренажа из работы под отдельными секциями

Расположение участка нарушения дренажа	Суммарный расход Total flow		Снижение расхода, % Flow decrease, %	Drainage failure location
	м³/сут m³/day	л/с l/sec		
Секция плотины в зоне берегового примыкания	2696,5	31,21	0,5	Dam section in bank abutment zone
Группа секций плотины в зоне берегового примыкания	2649,1	30,66	2,3	Group of dam sections in bank abutment zone
Секция плотины в зоне изменения свойств пород основания	2624,7	30,38	3,2	Dam section in the zone of foundation rock properties alteration
Группа секций плотины в зоне изменения свойств пород основания	2349,3	27,19	15,4	Group of dam sections in the zone of foundation rock properties alteration
Секция плотины в зоне наибольшего заглубления основания сооружения	2644,9	30,61	2,5	Dam section in the zone of structure foundation maximum embedment
Группа секций плотины в зоне наибольшего заглубления основания сооружения	2446,6	28,32	10,8	Group of dam sections in the zone of structure foundation maximum embedment

Пьезометрические напоры приведены на рис. 4, в, г и иллюстрируют изменение напоров в основании секции с наибольшим заглублением.

Сценарий 5. В сценарии выхода из строя противофильтрационной завесы были рассмотрены шесть случаев по увеличению коэффициента фильтрации. Коэффициент фильтрации основания первоначально был в 10 раз больше чем у цемзавесы, а затем увеличивался до значения принятого в основании (табл. 3).

При увеличении коэффициента фильтрации противофильтрационной завесы в 10 раз дренажные расходы увеличились на 34 %. Также на рис. 4, д, е заметно увеличение пьезометрического давления

Tab. 2. Prediction of drainage flows at failure of drainage under separate sections

The piezometric heads are shown in Figures 4, в, г and illustrate the heads changes in the dam section foundation with the maximum embedment.

Scenario 5. In the scenario of the grout curtain failure a smooth 10-time increase (from 0.001 m/day to 0.01 m/day) of the grout curtain seepage coefficient is modelled. The results of the studies are summarized in Tab. 3.

At 10-fold increase of the grout curtain seepage coefficient, the drainage flows increased by 34 %. Rise of piezometric pressure in the foundation of the structure is also

в основании сооружения. Зависимость дренажного расхода от коэффициента фильтрации противофильтрационной завесы дает представление о запасе производительности дренажной системы.

Табл. 3. Изменение дренажных расходов при увеличении K_{ϕ} цемзавесы

K_{ϕ}	Суммарный расход Total drainage		Доля от суммарного дренажного расхода, % Share of total drainage flow, %
	м³/сут m³/day	л/с l/sec	
0,001	2709,96	31,37	—
0,002	2953,80	34,19	8,3
0,003	3162,77	36,61	14,3
0,005	3506,85	40,59	22,7
0,008	3899,05	45,13	30,5
0,010	4104,90	47,51	34,0

Существенное увеличение расхода на дренаже при снижении коэффициента фильтрации противофильтрационной завесы показывает ее значимость для обеспечения проектного режима эксплуатации сооружения. Важно достоверное определение коэффициентов фильтрации противофильтрационной завесы как исходных данных для расчетов фильтрационного режима.

Сценарий 6. Нарушение работы противофильтрационной завесы на отдельных участках может быть вызвано различными факторами в период строительства и эксплуатации, а также неоднородностью противофильтрационной завесы вследствие широкого спектра технологических причин. Алгоритм расчета аналогичен предыдущему сценарию, а именно выполняется повышение коэффициента фильтрации завесы на заданном участке (табл. 4).

seen in Fig. 4, ∂ , e . The dependence of the drainage flow on the grout curtain seepage coefficient gives the idea of the drainage system capacity margins.

Tab. 3. Variation of drainage flows at grout curtain K_{ϕ} increase

The significant increase of drainage flow at reducing the grout curtain seepage coefficient shows the importance of the grout curtain in ensuring the design mode of the structure operation. It is essential to get the reliable determination of the grout curtain seepage coefficients as the basic data for seepage conditions computations.

Scenario 6. Local loss of the grout curtain seepage resistance may be caused by different factors during construction and operation periods and by the grout curtain non-uniformity due to a wide range of technological reasons. The computational algorithm is similar to that in the previous scenario, namely — smooth increase of the grout curtain seepage coefficient at the prescribed locality (Tab. 4).

Рис. 4. Разрезы с распределением пьезометрических напоров в секции бетонной плотины с наибольшим заглублением основания: а — сценарий 2 полный выход из строя дренажной завесы; б — сценарий 3 — уменьшение глубины дренажа на 10 %; в — сценарий 4 нарушение в работе дренажа под одной секцией; г — сценарий 4 нарушение в работе дренажа под группой секций; д — сценарий 5 увеличение K_{ϕ} противофильтрационной завесы до 0,01 л/с; е — сценарий 5 увеличение K_{ϕ} противофильтрационной завесы до 0,005 л/с

Fig. 4. The cuts with the distribution of piezometric pressures in the concrete section of the dam with the greatest depth of the Foundation: а — scenario 2 total drainage failure; б — scenario 3 partly drainage holes colmatage on 10 %; в — scenario 4 violation in the drainage under the same section; г — Scenario 4 violation in the drainage underneath the group of sections; д — scenario 5 the Increase in K_{ϕ} grout curtain failure to 0.01 l/sec; е — scenario 5 the Increase in K_{ϕ} grout curtain failure to 0.005 l/sec

Табл. 4. Изменение дренажных расходов при увеличении K_{ϕ} цемзавесы

Table 4. Variation of drainage flows at grout curtain K_{ϕ} increase

Местоположение зоны понижения фильтрационной прочности	K_{ϕ}	Суммарный расход Total flow		Увеличение расхода, % Flow increase, %	Location of seepage resistance decrease zone
		м³/сут m³/day	л/с l/sec		
Нормальная работа	0,001	2709,96	31,37	—	Normal operation
Группа секций плотины в зоне берегового примыкания	0,01	3437,30	39,78	21,2	Group of dam sections in bank abutment zone
Группа секций плотины в зоне изменения свойств пород основания	0,01	2924,10	33,84	7,3	Group of dam sections in the zone of foundation rock properties alteration
Группа секций плотины в зоне наибольшего заглубления основания сооружения	0,01	2917,90	33,77	7,1	Group of dam sections in the zone of structure foundation maximum embedmen
Секция плотины в зоне берегового примыкания	0,01	2788,40	32,27	2,8	Dam section in bank abutment zone
Секция плотины в зоне изменения свойств пород основания	0,01	2806,10	32,48	3,4	Dam section in the zone of foundation rock properties alteration
Секция плотины в зоне наибольшего заглубления основания сооружения	0,01	2758,97	31,93	1,8	Dam section in the zone of structure foundation maximum embedment

Суммарный дренажный расход во всех случаях возрастает, а также происходит увеличение пьезометрических давлений и противодействия на подошву сооружения. В рассматриваемом примере наибольшее увеличение дренажных расходов наблюдается в зоне берегового примыкания. Это вероятно связано со свойствами грунтов основания и движением фильтрующей воды в бортах створа (см. рис. 2).

Полученные результаты фильтрационного исследования далее необходимо использовать в расчетах напряженно-деформируемого состояния сооружения. Также максимальные

In all the cases the total drainage flow increases and piezometric pressure and uplift on the foot of the structure rise as well. In the case under study the maximum drainage flow increase is recorded in the bank abutment zone. This is due to the properties of the soils in the foundation and seeping water movement upon the bank impervious strata (Fig. 2).

The analysis results should be further used in the calculation of the stress strain state of the structures. The maximum drainage flows should not exceed the drainage pumps capacity.

The above allows making the following conclusions:

дренажные расходы не должны превышать производительность дренажных насосов.

Выводы. 1. Расчетное прогнозирование фильтрационного режима основания на математических моделях является важной частью расчетного обоснования проектов крупных гидротехнических сооружений.

2. Из исследования можно заключить, что для моделирования фильтрационного режима основания эффективен метод конечных элементов с учетом температурной аналогии. Расчеты могут выполняться на платформе универсальных промышленных программных комплексов метода конечных элементов, что дает возможность совмещать фильтрационное моделирование с другими видами расчетов системы плотина — основание, а также решать совместные задачи (термоупругость, тепломассоперенос, влияние объемных фильтрационных сил и др.).

3. В рамках расчетного прогнозирования фильтрационного режима основания целесообразно моделирование случаев отказа или выхода из строя противофильтрационных элементов конструкции сооружения. Дальнейшее использование их в особом сочетании нагрузок для получения напряженно-деформируемого состояния сооружения позволяет более качественно производить оценку надежности как самого сооружения, так и его отдельных элементов.

Библиографический список

1. *Losleben T.R.* Pilot Study of Horizontal Roughing Filtration in Northern Ghana as Pretreatment for Highly Turbid Dugout Water. Master of engineering thesis. USA Massachusetts institute of technology. 2008. 149 p.

1. The design prediction of seepage conditions in the foundation on the mathematical models is the essential part of the design validation of the large hydraulic structures projects.

2. The final elements method with due consideration for the temperature analogies principle is quite effective for the seepage conditions numerical modelling. The computations may be performed on the basis of the industrial-strength software complexes of the finite elements method, which makes it possible to combine seepage modelling with the other methods of computations of the dam — foundation system as well as to solve the inter-disciplinary problems (thermoelasticity, heat and mass transfer, impact of volume seepage forces, etc.).

3. Within the frames of the foundation seepage conditions prediction it is advisable to simulate the unfavorable seepage processes for evaluation of seepage-control facilities reliability. The continued use of the results in the special combination of loads for the stress state of the deformable structures enables the assessment of the reliability of the structure itself and of its individual elements.

References

1. *Losleben T.R.* Pilot Study of Horizontal Roughing Filtration in Northern Ghana as Pretreatment for Highly Turbid Dugout Water. Master of Engineering thesis. USA Massachusetts Institute of Technology, 2008, 149 p.

2. *Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Sainov M.P.* Analiz sostoyaniya gruntovoy plotiny Kolymskoy GES [State Analysis of Soil Kolyma Hydroelectric Power Station Dam]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009, special issue no. 2, pp. 111—118.

3. *Loginov V.A., Shabanov V.A.* Issledovanie fil'tratsionnykh techeniy v verkhovom kline gruntovoy plotiny [The Study of Filtration Flows in the Upper Wedge of Soil Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2011, no. 7, pp. 52—55.

2. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Саинов М.П. Анализ состояния грунтовой плотины Колымской ГЭС // Вестник МГСУ. 2009. Спецвып. № 2. С. 111—118.
3. Логинов В.А., Шабанов В.А. Исследование фильтрационных течений в верховом клине грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2011. № 7. С. 52—55.
4. Анахаев К.Н., Шогенова Ж.Х., Амишоев Б.Х. Расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемом основании разной мощности // Гидротехническое строительство. 2011. № 2. С. 29—33.
5. Бухарцев В.Н., Петриченко М.Р. Решение задачи о фильтрации в однородном прямоугольном грунтовом массиве на основе вариационных принципов // Гидротехническое строительство. 2012. № 3. С. 32—37.
6. Береславский Э.Н., Александрова Л.А., Пестерев Е.В. Математическое моделирование фильтрационных течений под гидротехническими сооружениями // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2009. № 16. Т. 5. С. 32—46.
7. Полубаринова-Кочина П.Я. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917—1967). М.: Наука, 1969. 545 с.
8. Белкова И.Н., Глаговский В.Б., Павловская Л.Н., Радченко В.Г. Оценка фильтрационной прочности грунтовой плотины на примере Ирганайской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2011. Т. 264. С. 3—12.
9. Мишин Д.В. Программная архитектура и интерактивная среда конечно-элементного расчетного комплекса ДИСК-Геомеханика // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2002. Т. 241. С. 193—196.
10. Белов А.Н., Горохов Е.Н. Трехмерное математическое моделирование температурного режима грунтовых плотин в криолитозоне // Приволжский научный журнал. 2010. № 1. С. 65—71.
4. Anakhaev K.N., Shogenova Zh.Kh., Amshokov B.Kh. Raschet fil'tratsii cherez zemlyanye plotiny na pronitsaemom osnovanii raznoy moshchnosti [Calculation of the Filtration through the Earthen Dam on Permeable Foundation of Different Capacity]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2011, no. 2. pp. 29—33.
5. Bukhartsev V.N., Petrichenko M.R. Reshenie zadachi o fil'tratsii v odnorodnom pryamougol'nom gruntovom massive na osnove variatsionnykh printsipov [The Solution of the Problem of Filtering in a Homogeneous Rectangular Earthen Array Basing on Variation Principles]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2012, no. 3. pp. 32—37.
6. Bereslavskiy E.N., Aleksandrova L.A., Pesterev E.V. Matematicheskoe modelirovanie fil'tratsionnykh techeniy pod gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami [Mathematical Modeling of Filtration Flows under Hydraulic Structures]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Fizika* [Proceedings of Belgorod State University Series: Mathematics. Physics]. 2009, no. 16, vol. 5, pp. 32—46.
7. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Razvitie issledovaniy po teorii fil'tratsii v SSSR (1917—1967)* [The Development of Investigations on Filtration Theory in the USSR (1917—1967)]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 545 p.
8. Belkova I.N., Glagovsky V.B., Pavlovskaya L.N., Radchenko V.G. Otsenka fil'tratsionnoy prochnosti gruntovoy plotiny na primere Irganayskoy GES [Estimation of Seepage Strength of Earth Dam by the Example of Irganaiskaya HPP]. *Izvestiya VNIIG imeni B.E. Vedeneeva* [News of the All-Union Scientific and Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev]. 2011, vol. 264, pp. 3—12.
9. Mishin D.V. Programmnaya arkhitektura i interaktivnaya sreda konechno-elementnogo raschetnogo kompleksa DISK-Geomekhanika [Program Arcgitecture and Interactive Environment of DISK-Geomechanics Finite Element Computation Set]. *Izvestiya VNIIG imeni B.E. Vedeneeva* [News of the All-Union Scientific and Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev]. 2002, vol. 241, pp. 193—196.

11. Панов С.И., Буяков О.А., Прямицкий А.В., Бычков Е.В. Влияние граничных и начальных условий на результаты расчетов температурного состояния грунтовых плотин на севере // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 44—54.
12. Анискин Н.А. Температурно-фильтрационный режим основания и плотины Курейской ГЭС во втором правобережном понижении // Вестник МГСУ. 2006. № 2. С. 43—52.
13. Горохов Е.Н. Температурный режим грунтов левобережного примыкания Вилуйской ГЭС-3 // Гидротехническое строительство. 2003. № 2. С. 12—15.
14. Горохов Е.Н. Теория и метод расчета температурно-криогенного режима плотин из каменной наброски в криолитозоне // Известия вузов. Строительство. 2005. № 9. С. 32—39.
15. Мархилевич О.К. Применение методов моделирования геофильтрации при проектировании гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2009. № 4. С. 61—72.
16. Сунцов Н.Н. Методы аналогий в аэрогидродинамике. М. : Физматлит, 1958. 324 с.
17. Анискин Н.А. Температурно-фильтрационный режим пригребневой зоны грунтовой плотины в суровых климатических условиях // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 129—137.
18. Sheng-Hong C. Adaptive FEM analysis for two-dimensional unconfined seepage problems // Journal of hydrodynamics. 1996. Ser. B. Vol. 8. No. 1. Pp. 60—66.
19. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М. : ДМК Пресс, 2011. 640 с.
20. Zhao Xiao-xi, Zhang Bao-lei, Wang Zong-ming. Stability analysis of seepage flow through earth dam of Huangbizhuang // Reservoir based on ANSYS/APDL Rock and Soil Mechanics. 2005. Режим доступа: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-
10. Belov A.N., Gorokhov E.N. Trekhmernoe matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo rezhima gruntovykh plotin v kriolitozone [3D Thermal Modeling of Soil Dams in Cryolithic Zone]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Review]. 2010, no. 1, pp. 65—71.
11. Panov C.I., Buryakov O.A., Pryamitskiy A.V., Bichkov E.A. Vliyanie granichnykh i nachal'nykh usloviy na rezul'taty raschetov temperaturnogo sostoyaniya gruntovykh plotin na severe [Influence of Boundary and Initial Conditions on the Calculation Results of Thermal State of Earth Dams in the North]. *Izvestiya VNIIG imeni B.E. Vedeneeva* [News of the All-Union Scientific and Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev]. 2012, vol. 266, pp. 44—54.
12. Aniskin N.A. Temperaturno-fil'tratsionnyy rezhim osnovaniya i plotiny Kureyskoy GES vo втором pravoberezhnom ponizhenii [Thermal and Filtration Behaviour of Dam Base and Structure of Kureyskaya Hydro-electric Power Plant at the Second Reduced Level of the Right Bank]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2006, no. 2, pp. 43—52.
13. Gorokhov E.N. Temperaturnyy rezhim gruntov levoberezhnogo primykaniya Vilyuyskoy GES-3 [Thermal Mode of Soils of the Left-bank Abutment of Vilyuyskaya-3 Hydro-electric Power Plant]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2003, no. 2, pp. 12—15.
14. Gorokhov E.N. Teoriya i metod rascheta temperaturno-kriogennogo rezhima plotin iz kamennoy nabroski v kriolitozone [Theory and Method of Analysis of Thermal and Cryogenic Mode of Rock-mound Dams in the Permafrost Zone]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Institutions of Higher Education. Construction]. 2005, no. 9, pp. 32—39.
15. Markhilevich O.K. Primenenie metodov modelirovaniya geofil'tratsii pri proektirovanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Application of modeling techniques of geofiltration when designing hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydro Review]. 2009, no. 4, pp. 61—72.

YTLX2005S2053.htm. Дата обращения: 24.08.2014.

21. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: Либроком, 2014. 272 с.

22. Locke M., Indraratna B., Adikari G. Time-Dependent Particle Transport Through Granular Filters// Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2001. Vol. 127. No. 6. Pp. 521—528.

23. Мгалобелов Ю.Б., Дейнеко А.В. Расчетное обоснование безопасности современных гидротехнических сооружений и особенности учета воздействий от технологического оборудования при землетрясении // Гидротехническое строительство. 2010. № 7. С. 46—51.

24. Евстигнеев Н.М. Ускорение расчетов инженерных задач, приводимых к эллиптическим операторам, с использованием графического процессора технологии CUDA // Строительное проектирование. 2009. № 2. С. 55—60.

Поступила в редакцию в сентябре 2014 г.

Об авторах: **Анискин Николай Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, директор института гидротехнического и энергетического строительства, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, nikolai_aniskin@mail.ru;

Антонов Антон Сергеевич — аспирант кафедры гидротехнических сооружений, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, a.s.antonov90@gmail.ru;

16. Suntsov N.N. *Metody analogiy v aerogidrodinamike* [Analog Method in Aerohydrodynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958, 324 p.

17. Aniskin N.A. Temperaturno-fil'tratsionnyy rezhim prigrebney zony gruntovoy plotiny v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Thermal and Filtration Behaviour of the Earth Dam Crest Area in Severe Climatic Conditions]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 4, pp. 129—137.

18. Sheng-Hong C. Adaptive FEM Analysis for Two-dimensional Unconfined Seepage Problems. *Journal of Hydrodynamics*. 1996, Ser. B, vol. 8, no. 1, pp. 60—66.

19. Basov K.A. *ANSYS: spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. The User's Guide]. Moscow, DMK Press Publ., 2011, 640 p.

20. Zhao Xiao-xi, Zhang Bao-lei, Wang Zong-ming. Stability Analysis of Seepage Flow through Earth Dam of Huangbizhuang. Reservoir Based on ANSYS/APDL Rock and Soil Mechanics. 2005. Available at: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-YTLX2005S2053.htm. Date of access: 24.08.2014.

21. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. *ANSYS v rukakh inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the Hands of an Engineer. Practical Guide.]. Moscow, Librokom Publ., 2014, 272 p.

22. Locke M., Indraratna B., Adikari G. Time-Dependent Particle Transport through Granular Filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2001, vol. 127, no. 6, pp. 521—528.

23. Mgalobelov Yu.B., Deyneko A.V. Raschetnoe obosnovanie bezopasnosti sovremennykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy i osobennosti ucheta vozddeystviy ot tekhnologicheskogo oborudovaniya pri zemletryaseni [Justifying Calculations of Modern Waterworks Safety and Peculiarities of Account for the Process Equipment Impact in Case of Earthquakes]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2010, no. 7, pp. 46—51.

24. Evstigneev N.M. Uskorenie raschetov inzhenernykh zadach, privodimykh k ellipticheskim operatoram, s ispol'zovaniem graficheskogo protsessora tekhnologii CUDA [Acceleration of Engineering Problems Calculation, which are Reduced to Elliptic Operators with GPU

Мгалобелов Юрий Борисович — доктор технических наук, профессор, академик Академии водохозяйственных наук, начальник отдела расчетных обоснований, **ОАО «Институт Гидропроект»**, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2, 8 (495) 940-54-57, yu.mgalobelov@hydroproject.ru;

Дейнеко Андрей Викторович — кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела расчетных обоснований, **ОАО «Институт Гидропроект»**, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2, 8 (495) 926-38-22, a.deyneko@hydroproject.ru.

Для цитирования: *Анискин Н.А., Антонов А.С., Мгалобелов Ю.Б., Дейнеко А.В.* Исследование фильтрационного режима оснований высоких плотин на математических моделях // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 114—131.

Technology CUDA]. *Stroitel'noe proektirovanie* [Construction Design]. 2009, no. 2. pp. 55—60.

Received in september 2014.

About the authors: **Aniskin Nikolay Alekseevich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair, Department of Hydraulic Engineering Structures, Director, Institute of Hydraulic Engineering and Energy Sector Construction, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nikolai_aniskin@mail.ru;

Antonov Anton Sergeevich — post-graduate Student, Department of Hydraulic Engineering Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; a.s.antonov90@gmail.ru;

Mgalobelov Yuriy Borisovich — Doctor of Technical Sciences, Academician, Academy of Water Sciences, Professor, Head, Department of Calculating Substantiation, **JSC “Institute Hydroproject”**, 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; yu.mgalobelov@hydroproject.ru; +7 (495) 940-54-57;

Deyneko Andrey Viktorovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head, Department of Calculating Substantiation, **JSC “Institute Hydroproject”**, 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; a.deyneko@hydroproject.ru; +7 (495) 926-38-22.

For citation: *Aniskin N.A., Antonov A.S., Mgalobelov Yu.B., Deyneko A.V.* Issledovanie fil'tratsionnogo rezhima osnovaniy vysokikh plotin na matematicheskikh modelyakh [Studying the Filtration Mode of Large Dams' Foundations on Mathematical Models]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 10, pp. 114—131.