ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ОСНОВАНИЯ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тетельмин В.В.,
доктор технических наук, главный научный сотрудник ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (Москва)

Аннотация. *Рассмотрены процессы фильтрации и конвективного теплообмена, развивающиеся в толще основания плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Дается оценка силового и охлаждающего влияния этих глубинных геодинамических процессов на изменение деформируемости и проницаемости пород основания и береговых примыканий плотины.*

Ключевые слова: *фильтрация, геодинамические процессы, деформируемость, проницаемость.*

Abstract. *For the fist time in hydrotechnic science there was modeled and obtained quantitative results of the characteristics of the Earth crust flexure depending on weight of large water storage basins: range and radius of the flexure. It is proposed to use new criterion of the flexion.*

Keywords: *water storage basin, springy Earth crust, range of flexure.*

Практика эксплуатации глубоких водохранилищ и высоких бетонных плотин показывает, что в системе «плотина — основание» часто наблюдаются многочисленные непроектные процессы. Например, на протяжении многих лет эксплуатации Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) происходят линейные и угловые перемещения секций арочных плотин, непрерывный рост арочных напряжений и схождение берегов [2, 8, 12, 24]. Отсюда следует, что в основаниях высоких плотин существуют не учитываемые практикой проектирования глубинные геодинамические процессы, которые нуждаются в соответствующем обосновании и исследовании.

К настоящему времени в мире создано около 50 крупных водохранилищ объемом более $25*10^9$ м^3 каждое. Они являются источниками мощных техногенных воздействий на геологическую среду и земную кору в целом [7, 10, 13, 17, 21, 25]. Глубокие водохранилища формируют на большой территории техногенную гидрогеологическую обстановку, а также техногенные геотермические поля [1, 14, 16, 23]. Создание глубоких водохранилищ порождает в больших массивах оснований плотин неустановившиеся фильтрационные процессы, проявляющиеся в многолетнем изменении силовых и температурных воздействий на вмещающие горные породы.

Результат силового воздействия фильтрационных процессов на НДС оснований высоких плотин напрямую зависит от назначенного расчетного объема фильтрующего геологического пространства. В то же время при проектировании высоких плотин расчетная толща фильтрующего основания, как правило, принимается в пределах первых 150 м. Считается, что на этой глубине залегает условный водоупор, ниже которого скальные породы непроницаемы. Для крупных гидроузлов этот постулат, строго говоря, неприменим.

Создание глубокого водохранилища формирует в геологическом пространстве ниже отметки уровня верхнего бьефа единый гидравлически связанный поток трещинно-поровых вод [1, 14, 15, 24]. Обычно метаморфические и интрузивные породы на глубинах залегания более 500–800 м характеризуются коэффициентом фильтрации 10^{-3}–10^{-6} м/сут [1, 5]. Однако невысокая проницаемость пород не мешает сконцентрированному в верхнем бьефе гидростатическому напору проникать в глубокие горизонты трещиноватых скальных оснований. Фильтрационный поток развивается там, где горные породы основания хотя бы в малой степени проницаемы. К примеру, практика геологоразведки на нефть и газ показывает, что на сотнях эксплуатируемых месторождений гидравлическая связь с речными системами наблюдается до глубин 3–4 км [3, 20]. Расчеты показывают [10, 13, 15], что минимальная расчетная глубина проникновения высоконапорного фильтрационного потока в толщу скального основания СШГЭС составляет не менее пяти напоров на гидроузле **(рис. 1)**.

Первый от земной поверхности слой с постоянной годовой температурой называют «нейтральным слоем». При среднем значении температуропроводности горных пород Земли (0,01 см^2/с) глубина залегания «нейтрального слоя» составляет 25,4 м [23]. От этого слоя вглубь массива обычно начинается естественный рост температуры с некоторым

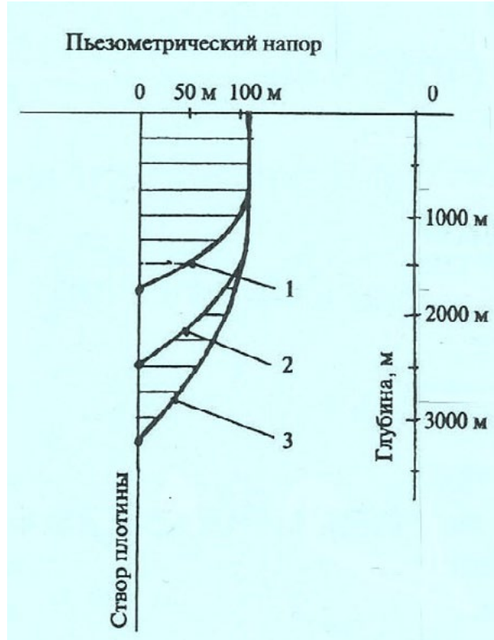

Рис. 1. Минимальная расчетная глубина проникновения фильтрационного потока и примерное распределение наведенного пьезометрического напора в толще основания плотины Саяно-Шушенской ГЭС на три момента времени: 1 — 2000 г.; 2 — 2020 г.; 3 — 2040 г.

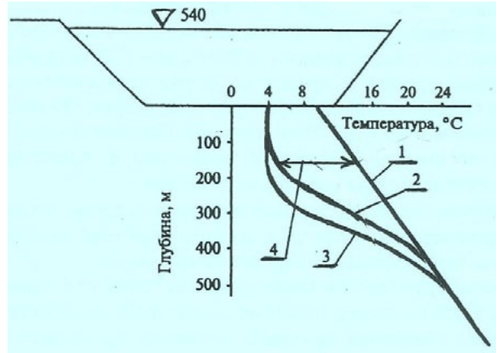

Рис. 2. Примерное распределение температур в массиве основания плотины СШГЭС в разные моменты времени: 1 — естественное температурное поле до наполнения водохранилища; 2 — температурное поле в 2015 г.; 3 — температурное поле в 2040 г.; 4 — величина охлаждения массива горных пород

геотермическим градиентом, среднее значение которого 0,03 град/м. Ниже «нейтрального слоя» годовые температурные амплитуды могут быть обусловлены только техногенными процессами, например фильтрацией.

Фильтрационный поток, развивающийся в основаниях и береговых примыканиях высоких плотин, вследствие большой динамичности и высокой теплоемкости воды, формирует мощные температурные аномалии. В высоких широтах водохранилища обычно «растепляют» земную кору. В средних и южных широтах глубокие водохранилища оказывают охлаждающее влияние на температурный режим земной коры, поскольку придонная вода в них имеет относительно невысокую температуру [23].

До наполнения водохранилища СШГЭС среднегодовая температура придонной воды в р. Енисей составляла примерно 10 °С (летом 16 °С, зимой 4 °С). До этого момента в подстилающем речное русло массиве существовало естественное температурное поле, изменение которого носило сезонный характер и не затрагивало внутренних зон массива. После наполнения водохранилища картина существенно изменилась. Придонные воды глубокого водохранилища, имеющие в течение всего года постоянную температуру около 4 °С, проникают вглубь массива и вызывают его медленное и непрерывное охлаждение.

В зависимости от инженерно-геологических условий створа инфильтрационные воды верхнего бьефа охлаждают прилегающий к области питания массив на глубину в сотни метров. Таким образом, в области инфильтрации под ложем водохранилища и под плотиной в горных породах образуются локальные отрицательные температурные аномалии. В области разгрузки подземного потока вода выносит из глубины массива аккумулированное ею тепло. Тем самым в области разгрузки создаются локальные положительные аномалии в геотемпературном поле геологической среды.

Площадь и интенсивность положительных и отрицательных температурных аномалий в районе створа плотины изменяются во времени и определяются температурой воды на границе питания и величиной фильтрационного расхода в основании и берегах. Например, за первые 20 лет эксплуатации СШГЭС фильтрационный поток неравномерно охладил основание плотины до глубины около 400 м: от 0 до 200 м — в среднем на 4 °С; от 200 до 400 м — на 2 °С. На **рис. 2** приводятся расчетные кривые изменения (охлаждения) температуры пород основания до глубины 500 м в плоскости створа плотины на три момента времени [16].

Изменение пьезометрического напора в большой толще трещиноватого скального массива **(рис. 1)** и изменение температуры **(рис. 2)** изменяют НДС основания и вызывают дополнительные деформации и перемещения плотины, не учитываемые проектом. Например, к 2040 г. от совместного действия названных глубинных геодинамических процессов ключевая секция плотины СШГЭС получит расчетную осадку около 40 мм, а длина хорды арочной плотины на отметке 540 м за счет «схождения берегов» уменьшится на 35 мм [16, 18].

Подобную реакцию плотины можно рассматривать как результат длительного изменения состояния и физико-механических свойств основания, вызванного процессами глубинной фильтрации и конвективного теплообмена. Рассмотрим количественную сторону этих процессов.

Согласно законам термодинамики, состояние равновесия любой среды, включая геологическую, определяется тремя основными переменными: температурой T, напряжением σ (или давлением p), плотностью ρ (или удельным объемом $V = 1/\rho$). Полная деформация горной породы равна сумме деформаций, вызванных изменениями напряжения $\Delta\sigma$ и температуры ΔT [22]:

$$\Delta V = -V\beta\cdot\Delta\sigma + V\alpha_V\cdot\Delta T, \quad (1)$$

где $\beta = 3(1-2\eta)/E$ — коэффициент изотермической сжимаемости; η — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; α_V — коэффициент объемного расширения. Материальные параметры β и α_V определяются в лабораторных условиях, их типичные значения для горных пород равны: $\beta = 10^{-11}$ Па$^{-1}$; $\alpha_V = 3*10^{-5}$ град$^{-1}$ [5, 15, 20].

Если рассматриваемое тело ограничено в деформациях и его объем не может меняться ($\Delta V = 0$), то из (1) следует, что при постоянном объеме типичной горной породы изменение температуры всего на 5 °С изменяет напряжение в образце на 15 МПа. По этой причине в практике гидротехнического строительства следует учитывать изменение НДС оснований и берегов, связанное с изменением их температуры.

Для изотропного напряженного состояния из общего уравнения термоупругости (1) получаем выражение для определения компоненты относительной деформации:

$$\Delta\varepsilon = \frac{(1-2\eta)\Delta\sigma}{E} - \alpha_t\Delta T, \quad (2)$$

где $\alpha_t = \alpha_V/3$ — коэффициент линейного теплового расширения. Здесь знак минус возникает из условия, согласно которому положительными считаются деформации сжатия.

При рассмотрении физической сущности происходящих процессов используем следующую модель скального основания с достаточной степенью формализации: изотропный скальный массив состоит из отдельных водонепроницаемых блоков, имеющих форму куба со стороной a. Блоки отделены друг от друга тремя системами ортогональных взаимопересекающихся трещин, образующих единую гидравлическую сеть. Трещины имеют исходное раскрытие b и густоту $\Gamma = 1/a$. Прерывистость сети трещин определяется коэффициентом прерывистости трещин α. Например, для основания плотины СШГЭС коэффициент α меняется в пределах от 20 до 80% [4].

После увеличения фильтрационного давления в той или иной точке скального массива на Δp втекающая в систему трещин вода сжимает (опрессовывает) блоки горной породы по смоченным граням. С учетом прерывистости сети трещин связь между изменением напряжения $\Delta\sigma$ в блоке и изменением пьезометрического давления Δp по его граням имеет следующий вид:

$$\Delta\sigma = \alpha\cdot\Delta p. \quad (3)$$

Если блоки горной породы ограничены в перемещениях ($\Delta\varepsilon = 0$), то из (2) и (3) получаем зависимость

$$\Delta T = \frac{\alpha(1-2\eta)}{E\alpha_t} - \Delta p, \quad (4)$$

Это выражение позволяет определять приращение температуры ΔT горной породы, которое по деформирующему воздействию на массив эквивалентно приращению пьезометрического напора Δp в фильтрующей толще основания.

Процессы охлаждения скального основания и «опрессовки» его блоков (отдельностей) со стороны высоконапорного фильтрационного потока «разрыхляют» массив скальных пород, уменьшают плотность упаковки отдельных блоков **(рис. 3)**. От этого существенно изменяются основные физико-механические свойства основания и берегов: проницаемость и модуль деформации.

От увеличения фильтрационного давления в трещинах скального массива на Δp линейный размер a каждого блока уменьшается на величину:

$$\Delta a = \frac{\alpha(1-2\eta)\,\Delta p}{E}\cdot a, \quad (5)$$

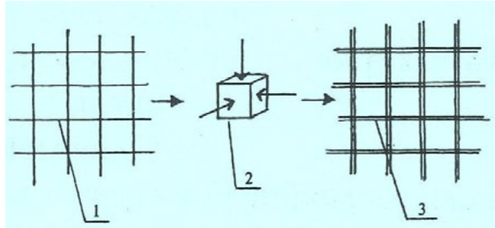

Рис. 3. Изменение состояния сети трещин в скальном массиве в результате воздействия пьезометрического напора: 1 — исходное состояние системы сомкнутых трещин; 2 — фильтрационное обжатие (опрессовка) отдельного блока горной породы; 3 — система раскрытых трещин после увеличения пьезометрического напора

Охлаждение блоков трещиноватого массива на величину ΔT эквивалентно по реакции массива (по деформации) повышению пьезометрического давления в трещинах на некоторую величину Δp. Повышение пьезометрического давления в трещинах увеличивает напряжение σ в блоках на $\Delta\sigma$. Увеличение напряжений в блоках трещиноватого массива на величину $\Delta\sigma$ оказывает такое же воздействие на его деформацию, какое оказывает снижение модуля упругости на некоторую эквивалентную величину $(-\ E) = E\cdot\Delta\sigma/\sigma$. Эту взаимообусловленность физических параметров можно представить следующей схемой:

$$-\Delta T \rightarrow \Delta p \rightarrow \Delta\sigma \rightarrow -\Delta E. \quad (6)$$

Значение коэффициента фильтрации $k_ф$ трещиноватого скального массива, содержащего три системы ортогональных трещин раскрытием b, определяется известной зависимостью [6, 20]:

$$k_ф = \frac{\rho g b^3}{6\mu a}, \quad (7)$$

где ρ и g — плотность воды и ускорение силы тяжести; μ — динамическая вязкость воды; b — раскрытие трещины.

Особенностью скальных массивов является то, что их проницаемость обусловлена преимущественно межблоковой трещинной проницаемостью. К примеру, при значении раскрытия трещин b = 0,05 мм и размере слагающих блоков a = 1 м исходная проницаемость массива $k_ф$ = 0,02 м/сут. От сжатия каждого блока на a раскрытие b трещин в фильтрующей области получает приращение $\Delta b = \Delta a$. В результате в соответствии с (5) обеспечивается дополнительное раскрытие фильтрующих трещин, что увеличивает проницаемость массива и его деформируемость.

Подтверждением зависимости проницаемости горных пород от пластового давления являются результаты исследований нефтяных пластов методом фильтрационных волн давления. Так, в полевых опытах при изменении пластового давления от 18 до 21 МПа трещинная пустотность на глубине 1700 м увеличилась на 7%, а коэффициент пьезопроводности увеличился с 5,3*103 до 6,5*103 см^2/с [20]. Промысловыми исследованиями на месторождениях нефти установлено, что для трещиноватых и трещиновато-пористых коллекторов наблюдается экспоненциальная зависимость коэффициента проницаемости от изменения порового давления Δp [20].

Охлаждение блока трещиноватого массива на величину ΔT эквивалентно по реакции массива повышению пьезометрического давления в трещинах на величину Δp (4) и увеличению раскрытия трещин на $\Delta b = \Delta a$ (5). Увеличение раскрытия трещин на Δb увеличивает проницаемость массива на $\Delta k_ф$ (7). Схематически эту зависимость между физическими параметрами можно представить следующей цепочкой:

$$-\Delta T \rightarrow \Delta p \rightarrow \Delta b \rightarrow \Delta k_ф. \quad (8)$$

В основании плотины СШГЭС наибольшую водопроницаемость имеют скальные породы вблизи контакта «бетон — скала» (отм. 308–315 м). Здесь величина удельного водопоглощения составляет в среднем от 0,2 до 0,5 л/мин. В зоне основания между отметками 250–280 м водопроницаемость пород снижается. В проекте принято, что на глубине около 100 м от подошвы плотины располагается граница относительного водоупора. Однако в реальности горные породы на более низких отметках тоже проницаемы. Они вмещают фильтрационный поток, передающий на большую глубину повышенные пьезометрические напоры.

Рассмотрим насколько повышение пьезометрического давления на Δp в трещинах фильтрующего скального массива и понижение температуры массива на ΔT изменяют его состояние: модуль упругости E и коэффициент фильтрации $k_ф$. Приводимые ниже зависимости легко получаются с использованием выражений (2–8).

Увеличение пьезометрического давления в трещинах скальной породы на Δp уменьшает модуль деформации E массива на ΔE в соответствии со следующим выражением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\alpha(1-\eta)}{\sigma}\cdot\Delta p, \quad (9)$$

где α — коэффициент прерывистости сети трещин; η — коэффициент Пуассона; σ — напряжение сжатия в расчетной области массива.

Пример 1. Геостатическое давление (напряжение σ) в основании плотины СШГЭС на глубинах 100; 300 и 500 м примерно равно 9,5; 15 и 21 МПа, соответственно. При базовом значении напора в ВБ гидроузла, соответствующем отметке УВБ 500 м, в основании плотины устанавливается пьезометрическое давление Δp = 1,0 МПа **(рис. 1)**. При α = 0,5 и η = 0,2 находим из (9) значения относительного отрицательного приращения модуля упругости ($-\Delta E/E$) на глубинах 100; 300 и 500 м: 3,2; 2,0 и 1,3%, соответственно. Как видим, от увеличения фильтрационного напора в трещинах эффективный модуль упругости скального массива уменьшается незначительно — в пределах первых процентов **(рис. 4, а)**.

Увеличение давления в трещинах на Δp увеличивает исходное значение коэффициента фильтрации $k_ф$ скального массива на величину $\Delta k_ф$ в соответствии со следующим выражением:

$$\frac{\Delta k_ф}{k_ф} = \frac{2\alpha(1-\eta)\cdot a}{b\cdot E}\cdot\Delta p, \quad (10)$$

где a — средний размер слагающих массив блоков горной породы; E — модуль упругости блоков; b — среднее раскрытие трещин, уменьшающееся с глубиной.

Пример 2. Примем, что в основании СШГЭС на глубинах 100; 300 и 500 м эффективное раскрытие трещин, соответственно, составляет b = 0,1; 0,05 и 0,01 мм. При значениях a = 1 м, E = 50 ГПа находим относительное увеличение проницаемости от увеличения давления на p = 1,0 МПа на глубинах 100; 300 и 500 м: 12; 24 и 120%, соответственно **(рис. 5, а).** Как видим, влияние фильтрационного давления в трещинах на проницаемость скального массива является существенным.

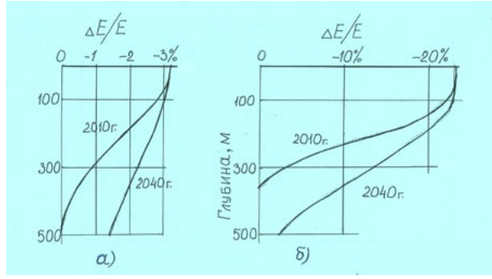

Рис. 4. Относительное изменение эффективного модуля деформации скальных пород основания плотины СШГЭС за 30 и 60 лет эксплуатации, вызванное отдельно: а — увеличением напора в трещинах; б — уменьшением температуры массива

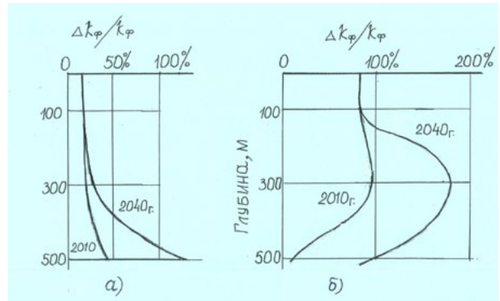

Рис. 5. Относительное изменение проницаемости основания плотины СШГЭС за 30 и 60 лет эксплуатации, вызванное отдельно: а — увеличением напора в трещинах; б — уменьшением температуры массива

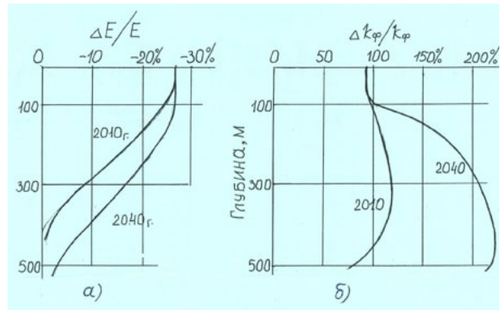

Рис. 6. Относительное уменьшение модуля упругости (а) и увеличение проницаемости (б) основания плотины СШГЭС, вызванные совместным действием глубинных геодинамических процессов

По мере увеличения глубины влияние пьезометрического давления на проницаемость скального массива возрастает.

Принятым в примере 2 трем значениям раскрытия трещин соответствуют следующие значения проницаемости kф: на глубине 100 м — коэффициент фильтрации 0,13 м/сут; на глубине 300 м — $2*10^{-3}$ м/сут; на глубине 500 м — $1,5*10^{-4}$ м/сут. Полученное из выражения (10) большое (на 120%)

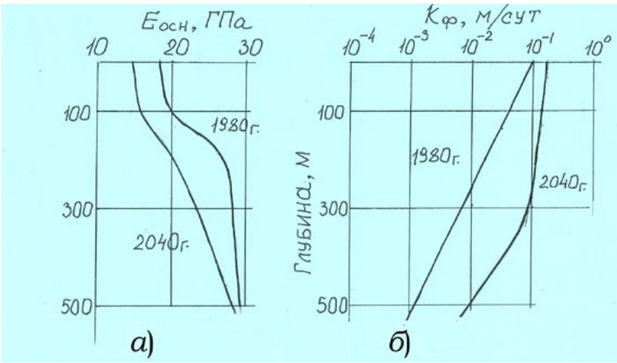

Рис. 7. Расчетное увеличение деформируемости (а) и проницаемости (б) основания плотины СШГЭС в абсолютных показателях за 60 лет эксплуатации

относительное увеличение проницаемости от увеличения давления на глубине 500 м объясняется низкой исходной проницаемостью массива на этой глубине.

На протяжении всех лет эксплуатации глубокого водохранилища СШГЭС установившийся фильтрационный поток с температурой инфильтрации 4 °С охлаждает скальный массив основания плотины. Рассмотрим влияние изменения температуры массива на изменение его упругих и фильтрационных свойств. Зависимость изменения эффективного модуля упругости скальных пород от изменения их температуры определяется так:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\alpha \cdot E\, \alpha_t}{\sigma} \cdot \Delta T, \quad (11)$$

Пример 3. Метаморфические сланцы в основании плотины СШГЭС характеризуются коэффициентом линейного температурного расширения $\alpha_t = 1*10^{-5}$ град$^{-1}$. За 60 лет эксплуатации глубокого водохранилища к 2040 г. скальный массив основания за счет конвективного теплопереноса неравномерно охладится: на глубине 100 м под плотиной — на ΔT = 9 °С; на глубине 300 м — на 8 °С; на глубине 500 м — на 1 °С **(рис. 2).** Используя эти значения температур и названные в примере 1 значения напряжений и параметров трещиноватого скального основания плотины, из (11) получаем: на глубине 100 м исходное значение модуля упругости массива уменьшается, по сравнению с исходным значением, на 23%; на глубине 300 м — на 13%; на глубине 500 м — на 1,0% **(рис. 4, б)**. Таким образом, охлаждающее воздействие фильтрационного потока заметно увеличивает деформируемость скального основания плотины СШГЭС.

Влияние изменения температуры массива на изменение коэффициента фильтрации определяется следующей аналитической зависимостью:

$$\frac{\Delta k_ф}{k_ф} = \frac{2\alpha \cdot \alpha_t \cdot \alpha}{b} \cdot \Delta T, \quad (12)$$

Пример 4. Используя раскрытие трещин на глубинах 100 м, 300 м, 500 м в основании плотины СШГЭС (пример 2) и изменение температур на этих же глубинах в процессе эксплуатации (пример 3), из выражения (12) находим: на глубине 100 м к 2040 г. коэффициент $k_ф$ увеличивается на 80%; на глубине 300 м — на 180%; на глубине 500 м — на 100% **(рис. 5, б)**. Например, каждый градус охлаждения массива на глубине 500 м на ΔT = 1 °С увеличивает его исходную проницаемость в 2 раза. Как видим, охлаждающее влияние конвективного теплопереноса на проницаемость скального основания плотины является сильным.

Результат совместного воздействия обоих техногенных геодинамических факторов на относительное увеличение деформируемости и проницаемости массива основания плотины СШГЭС приводится на **рис. 6**. По мере заглубления в пределах первых 300 м модуль деформации массива основания уменьшается на 26–15%, а проницаемость увеличивается на 92–204%.

На **рис. 7** показан прогнозный расчет увеличения деформируемости и проницаемости массива основания плотины СШГЭС до глубины 500 м в абсолютных показателях за период с 1980 по 2040 гг. Видим, что техногенное влияние роста фильтрационного давления в трещинах и снижения температуры массива на физико-механические свойства скальных пород настолько значительно, что пренебрегать ими при расчетах НДС основания и плотины не следует. Именно эти долговременные нестационарные процессы в основании и береговых примыканиях являются причиной наблюдаемого нестационарного состояния плотины СШГЭС и других высоких плотин.

Влияние других техногенных процессов на «неупругое» поведение высоких плотин менее значительно. Например, процесс выщелачивания зацементированной части подземного контура плотины также медленно увеличивает деформируемость и проницаемость массива. Однако, в отличие от глубинных процессов фильтрации и конвективного охлаждения, химическая суффозия зацементированного пространства происходит в относительно небольшой части основания. Если принять за критерий соотношение объемов зацементированного массива и фильтрующего массива, то вклад процессов выщелачивания в обеспечение нестационарности поведения плотины СШГЭС составляет не более 3% [9, 10, 19]. Влияние и вклад процесса прогиба земной коры [17, 18, 21, 25] от веса водохранилища в изменение НДС системы «плотина — основание» также не превышает 2%.

Выводы

1. Фильтрация и конвективный теплообмен являются основными глубинными геодинамическими процессами в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Глубокое водохранилище вовлекает в процессы фильтрации и конвективного теплообмена большую толщу массива основания и береговых примыканий. Системы трещин и тектонических разломов в створе СШГЭС образуют единую неразобщенную водонапорную систему до глубины не менее 1000 м.

2. Глубокое водохранилище СШГЭС насыщает основание и береговые примыкания плотины водой высокого напора, заряжает большую область массива упругой и тепловой энергией, которая совершает работу по деформированию и изменению физико-механических свойств скальных пород. С точки зрения обеспечения деформационных процессов в створах высоких плотин повышение фильтрационного напора и уменьшение температуры пород эквивалентно уменьшению эффективного модуля деформации скального основания.

3. В процессе эксплуатации СШГЭС к 2010 г. фильтрационный поток неравномерно охладил основание и берега до глубины 300–400 м. В глубоких горизонтах массива продолжаются охлаждение и рост фильтрационного напора, что обеспечивает непрерывное изменение напряженно-деформированного состояния основания и, как следствие, обеспечивает непрекращающийся рост перемещений плотины, разуплотнение контакта «бетон — скала», уменьшение длины хорды арки, рост арочных напряжений в бетоне, а также изменяет пространственное положение гидроагрегатов.

4. К 2040 г. за счет увеличения фильтрационного напора и охлаждения массива эффективная деформируемость основания до глубины 500 м ниже подошвы плотины СШГЭС увеличится в среднем на 15%, а расчетная проницаемость на 100%, что в будущем может негативно отразиться на состоянии комплекса «плотина — основание — берега».

5. Направленность глубинных геодинамических процессов в створе СШГЭС снижает коэффициент запаса устойчивости плотины на сдвиг, расчетная величина которого без учета этих процессов находится в пределах 1,25–1,30 при НПУ 539 м и 1,16–1,22 при ФПУ 547,5 м. Необходимо выполнить расчет текущего и прогнозного коэффициента запаса устойчивости плотины с учетом воздействия на нее глубинных геодинамических процессов в основании и берегах.

Литература

1. Всеволожский В. А. Основы гидрогеологии. М.: Изд-во МГУ, 2007. 448 с.

2. Марчук А. Н., Марчук Н. А. Тектонофизические аспекты напряженно-деформированного состояния больших бетонных плотин // Гидротехническое строительство. 2010. № 3. С. 31–35.

3. Мартынов В. Г., Керимов В. Ю., Шилов Г. Я. и др. Геофлюидальные давления и их роль при поисках и разведке месторождений нефти и газа. М.: ИНФА-М, 2013. 347 с.

4. Пирогов И. А., Могилевская С. Е., Комаров Ю. С. и др. Разуплотнение скальных оснований высоких бетонных плотин со стороны верховой грани (на примере Саяно-Шушенской плотины) / Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: сб. докладов третьей научно-техн. конференции. С.-Пб.: ВНИИГ, 2008. С. 251–258.

5. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 360 с.

6. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966.

7. Савич А. И., Газиев Э. Г. Влияние водохранилищ на поведение скальных массивов оснований высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2005. № 11. С. 33–37.

8. Стефаненко Н. И., Затеев В. Б., Пермякова Л. С. и др. Поведение Саяно-Шушенской плотины после катастрофического разрушения здания ГЭС // Гидротехническое строительство, 2010. № 1. С. 5–10.

9. Тетельмин В. В. Специальные вопросы инъекционного закрепления скальных пород. Л.: Энергия, 1978. 76 с.

10. Тетельмин В. В., Уляшинский В. А. Техногенные воздействия и процессы в скальных основаниях плотин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 160 с.

11. Тетельмин В. В. Анализ необратимых процессов в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2010. № 2. С. 47–51.

12. Тетельмин В. В. Нестационарное состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС и его основные причины. Разрушение гидроагрегата № 2 СШГЭС: причины и уроки: сборник материалов. Том 1. М.: НП Гидроэнергетика России, 2013. С. 384–394.

13. Тетельмин В. В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС: состояние, процессы, прогноз. М.: ЛИБРОКОМ, 2011. 240 с.

14. Тетельмин В. В. Упругий режим фильтрации в основаниях высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2009. № 5. С. 17–22.

15. Тетельмин В. В. Коэффициенты упругоемкости и пьезопроводности в задачах нестационарной фильтрации в основаниях высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2011. № 2. С. 33–38.

16. Тетельмин В. В., Даниелов Э. Р. Конвективный теплообмен в основаниях высоких бетонных плотин как одна из причин их нестационарного состояния // Гидротехника. 2014. № 4. С. 6–9.

17. Тетельмин В. В., Даниелов Э. Р. Реакция земной коры на создание крупных водохранилищ // Гидротехника. 2014. № 3. С. 51–55.

18. Тетельмин В. В. Глубинные геодинамические процессы как причина нестационарного состояния высоких бетонных плотин / Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: доклады 8-й научно-технической конференции. С.-Петербург. 2014. С. 117–120.

19. Тетельмин В. В., Шугалей Р. Т. Оценка химической суффозии в основаниях плотин Зейской и Саяно-Шушенской ГЭС // Известия ВНИИГ. 1987. Т. 203. С. 38–42.

20. Тетельмин В. В., Язев В. А. Нефтегазовое дело. Полный курс. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2009. 800 с.

21. Тетельмин В. В. Воздействие крупных гидроузлов на изостатическое состояние земной коры / Доклады 5-го Всероссийского совещания гидротехников. Санкт-Петербург: НП Гидроэнергетика, 2013. С. 198–200.

22. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.

23. Фролов Н. М. Гидрогеотермия. М.: Недра, 1968. 316 с.

24. Юсупов Т. М., Решетникова Е. Н., Александров Ю. Н. Оценка состояния системы «плотина — основание» Саяно-Шушенской ГЭС по завершении этапа наполнения водохранилища в 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2013. № 4.

25. Kaufman G., Amelung F. Reservoir-induced deformacion and continental rheology in vicinity of Lake Mead // Journal of Geophysical research. 2000. V.105. № B7. P. 341–358.