

## Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

*К.т.н., доцент С.Н. Эйгенсон;  
к.т.н., доцент Н.В. Корихин;  
к.т.н., доцент А.И. Головин,*

*ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»*

**Аннотация.** Работа посвящена экспериментальному исследованию напряженного состояния ответственных конструкций гидротехнических сооружений: вилке напорного трубопровода крупного гидроагрегата и упруго заземленных толстых арок, ослабленных круговыми отверстиями.

Точное знание напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции на стадии проектирования является важнейшим условием надежности сооружения. Аналитические методы расчета, включая численные (в частности, метод конечных элементов – МКЭ), развиваются и совершенствуются. Экспериментальные методы исследования НДС конструкций на моделях дополняют расчетные и эффективно с ними сочетаются.

Исследование осуществлялось методом фотоупругости с применением способа «замораживания» деформаций, который использует способность эпоксидных полимеров сохранять неизменной оптическую анизотропию, вызванную нагружением модели, и после разгрузки. Результаты позволили уточнить распределение напряжений в характерных опасных сечениях конструкций, оценить достоверность расчета концентрации напряжений около отверстий в арках с помощью МКЭ.

**Ключевые слова:** вилка напорного трубопровода; арка с отверстиями; метод фотоупругости; моделирование; «замораживание» деформаций; напряженное состояние; концентрация напряжений

Крупные гидроэнергетические сооружения, как правило, являются уникальными, так как места их расположения определяются уникальными природными условиями и особенностями местности. Естественно, уникальность объекта требует максимального количества информации и данных о нем для обеспечения требований нормативной документации по безопасности и надежности [1, 2]. Большинство опубликованных работ посвящено решению частных задач применительно к созданию того или иного уникального гидротехнического сооружения, задачи решались как с использованием расчетных, так и экспериментальных методов [3–16].

Опыт эксплуатации гидротехнических объектов показал, что в условиях возможных аварийных ситуаций, которые могут привести к катастрофическим последствиям, наиболее проблемными являются напорные трубопроводы водоподводящего тракта как с точки зрения прочности части зоны сооружения в районе нижнего бьефа плотины, так и с точки зрения прочности самой арочной плотины ввиду ослабления сечения при прохождении через нее трубопроводов. Напряженное состояние элементов гидротехнического сооружения и плотины в целом характеризуется значительными концентрациями напряжения ввиду резкого изменения формы и размеров, а также применения в конструкциях материалов, имеющих различные механические характеристики.

Среди экспериментальных методов определения напряжений в конструкциях и деталях машин достаточно полную и надежную информацию о НДС дает метод фотоупругости, точнее — поляризационно-оптический метод исследования напряжений [17–21]. Этот метод является наиболее эффективным для исследования областей конструкций с высокими градиентами напряжений. Однако следует отметить, что этот метод достаточно дорогостоящий и трудоемкий как с точки зрения стоимости материальных ресурсов для обеспечения эксперимента, так и с точки зрения временных затрат, особенно при расшифровке оптических картин. Это в какой-то мере сдерживало применение метода для анализа НДС крупных гидротехнических сооружений. В настоящее время в связи с появлением цифровой обработки изображений методы фотоупругости опять стали широко применяться в промышленности [21–27].

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

Это подтолкнуло авторов к экспериментальному исследованию напряженного состояния двух ответственных конструкций: нижнего участка напорного трубопровода гидроагрегата и поперечного сечения арочной плотины, ослабленного отверстиями (упруго защемленных толстых арок, ослабленных отверстиями). Оригинальность работы обусловлена тем, что в ней исследовались типовые элементы, характерные для всех уникальных крупных гидротехнических сооружений.

### Постановка задачи и актуальность исследования

Современные крупные ГЭС [4, 5] используют высоконапорные радиально-осевые гидротурбины большой единичной мощности. Вода к турбине подводится напорным трубопроводом, состоящим из двух труб большого диаметра, которые сходятся в одну перед спиральной камерой. Применяемые в настоящее время напорные турбинные трубопроводы [6, 7] рассчитываются [8] на напор до 1000 м и изготавливаются в широком диапазоне диаметров: от 0,5 до 10 м. Толщина металла в них колеблется от 32 до 45 мм. Поэтому перспективными направлениями совершенствования конструкции являются применение стали с повышенным до 500...550 МПа пределом текучести и уменьшение запаса прочности за счет более качественного проектирования конструкций. Последнее возможно как посредством уточнения расчетных методов так и с помощью углубленного изучения напряженного состояния на моделях.

Экспериментальное исследование напряжений вокруг нижнего участка трубопровода (вилки) актуально ввиду ответственности конструкции, необходимости учесть совместную работу стальной трубы и окружающего ее бетона, получить данные для проектирования примыкающих к вилке элементов здания ГЭС.

Водоподводящий тракт типового агрегата состоит из двух напорных металлических трубопроводов диаметром до 7,5 м и с максимальной толщиной стенки на нижнем участке до 32 мм, расположенных в бетонном массиве. Перед входом в турбинную камеру эти трубопроводы соединяются в один трубопровод, разделенный диафрагмой толщиной до 60 мм (рис. 1). При наличии определенных природных условий в гидроэнергетике применяются высотные арочные плотины, обладающие рядом существенных достоинств по сравнению с гравитационными [4]. Вопросам расчета арочных плотин и повышения их надежности при статическом и динамическом нагружении посвящено много работ [8–13]. Применяются расчетные методы, основанные на современном приближенном численном методе конечных элементов (МКЭ) [14, 15].

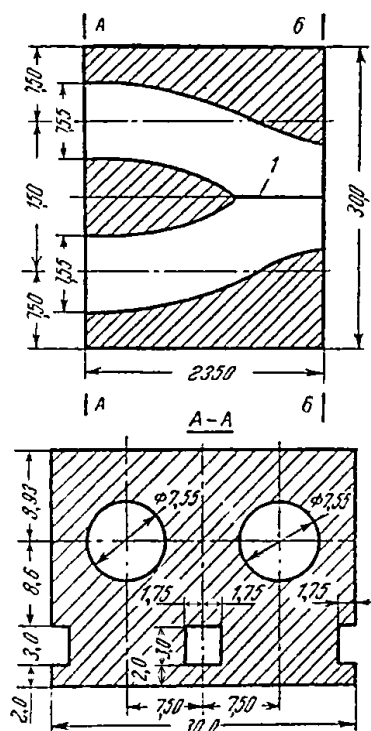


Рисунок 1. Фрагмент нижнего участка трубопровода (размеры в м); 1 – диафрагма

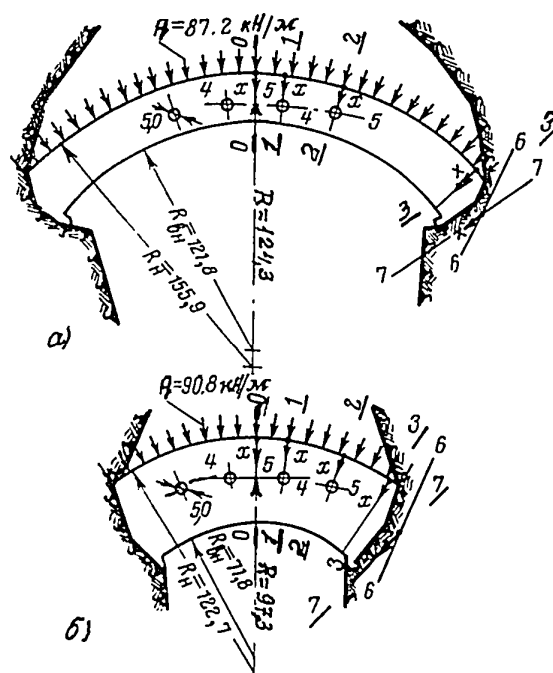


Рисунок 2. Исследуемые арки и их сечения

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

После трагических событий на Саяно-Шушенской ГЭС [16] стала особенно очевидной необходимость обеспечения безопасности гидротехнических сооружений, в том числе напорных трубопроводов и арочных плотин. Актуально экспериментальное исследование напряженного состояния такой ответственной высоконагруженной конструкции. Изучались две упруго защемленные арки, ослабленные рядом круговых отверстий.

Целью исследования являлось изучение влияния ряда отверстий, имитирующих трубопроводы, на напряженное состояние в арочных (горизонтальных) сечениях плотины. Кроме того, исследование предусматривало определение напряжений в арке, опирающейся на податливое скальное основание. Очевидно, эти напряжения значительно отличаются от напряжений, которые могут быть вычислены аналитическим путем при жестком защемлении арки на скальное основание.

Исследование выполнялось на плоских моделях, имитирующих арочные сечения плотины на различных отметках (рис. 2). Характерные размеры арок приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Характерные размеры арок**

Арка	Наружный радиус $R_n$ , м	Внутренний радиус $R_b$ , м	Средний радиус $R_{cp}$ , м	Размер ключа $h$ , м	$\frac{R_{cp}}{h}$	Радиус отверстия $r$ , м	$h/r$	Угол раствора $2\alpha$ , град
I	155,9	121,8	142,3	26,7	5,33	2,5	10,7	106
II	122,7	71,8	100,4	44,5	2,34	2,5	17,8	84

Четыре отверстия диаметром 5 м располагаются в обеих арках симметрично относительно ключевого сечения. В арке I (рис. 2а) центры отверстий лежат на дуге радиуса  $R$ , пересекающей ключевое сечение на расстоянии 5  $r$  от внутренней грани; в арке II (рис. 2б) – на дуге радиуса  $R$ , проходящей посередине ключевого сечения. Расстояние между центрами отверстий равно 11  $r$  ( $r$  – радиус отверстия).

### Методика экспериментального исследования

Исследование осуществлялось методом фотоупругости с применением способа «замораживания» деформаций [17, 18]. В основе метода фотоупругости лежит явление двойного лучепреломления в некоторых прозрачных оптически чувствительных материалах (отвержденных эпоксидных компаундах) под нагрузкой. Параметры двулучепреломления зависят от напряженного состояния моделей, их можно измерять при просвечивании модели в поляризованном свете. Метод фотоупругости отличается наглядностью, высокой точностью и, в отличие от других экспериментальных методов, дает информацию о напряженном состоянии во всем объеме исследуемой детали.

Способ «замораживания» деформаций использует способность эпоксидных полимеров сохранять неизменной оптическую анизотропию, вызванную нагружением модели, и после разгрузки, если процесс испытания происходит следующим образом. Модель нагружается и выдерживается при температуре 120°C – эпоксидная смола находится в высокоэластичном (резиноподобном) состоянии. Далее модель под нагрузкой медленно охлаждается до комнатной температуры, и нагрузка снимается. Смола возвращается в стеклообразное состояние, а упругие деформации и соответствующие им оптические эффекты фиксируются – «замораживаются». Плоскую модель можно просвечивать в полярикопе. Объемную модель необходимо распилить на тонкие плоские шлифы (срезы) и просвечивать их в полярикопе; по результатам измерений определяются компоненты объемного напряженного состояния.

Особенности моделирования напряженного состояния исследуемых конструкций (изготовление моделей, нагружения их, расшифровка напряженного состояния, пересчет на натуру) изложены ниже. Необходимо отметить, что в ранее опубликованных работах [17–21] описано применение метода для решения задач прочности гидротехнических сооружений и деталей машин.

Постоянное развитие и совершенствование метода фотоупругости (развернутый обзор его приведен в работе [22]) привело к применению цифровых методов обработки изображений [23], что позволило снизить трудоемкость и повысить точность эксперимента.

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

### Нижний участок напорного трубопровода крупного гидроагрегата

Объемная модель была изготовлена в масштабе 1:200 из эпоксидной смолы ЭД-16 путем отливки в специальной форме. Отлитые модели подвергались механической обработке и окончательно обрабатывались вручную; всего было изготовлено три модели из одного исходного материала.

Для моделирования металлической облицовки применялся клей холодного отверждения, который наносился тонким равномерным слоем на внутреннюю поверхность трубопроводов. Диафрагма изготавливалась отдельно, а затем клеивалась в модель. Модули нормальной упругости материала модели и клея были подобраны так, чтобы их соотношение соответствовало  $E_b : E_c$ , где  $E_b$  – модуль упругости бетона, а  $E_c$  – модуль упругости стали.

Испытание необходимо было провести на действие гидростатического давления с напором на оси вилки 128,7 м. Горизонтальное расположение вилки позволяет приближенно считать, что стенки трубопроводов нагружены равномерно. Нагрузки моделей осуществлялись сжатым воздухом, подаваемым компрессором. Предохранительный клапан, расположенный на ресивере, поддерживал постоянное давление независимо от утечек воздуха в системе. Модели помещались в бак, наполненный глицерином, и нагревались в термостате до температуры «замораживания».

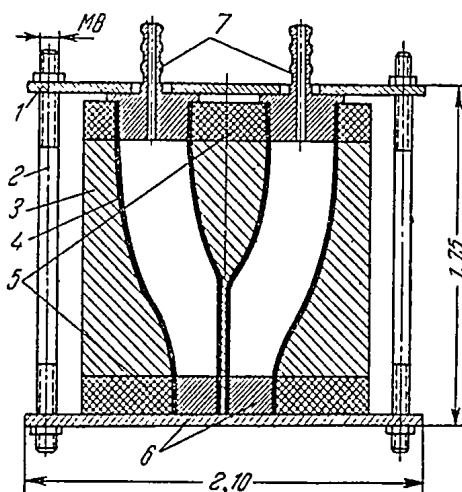
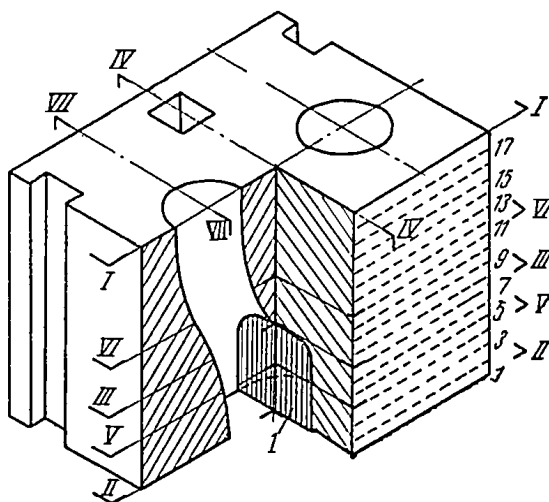


Рисунок 3. Устройство для загрузки модели

Передача давления на модель осуществлялась с помощью специального устройства (рис. 3). В трубопроводы пропускались эластичные резиновые трубки 4, наружный диаметр которых равен внутреннему диаметру трубопроводов. С одного конца в трубки клеивались металлические заглушки 6, с другого – штуцеры 7, через которые подавался воздух. Прокладки из эпоксидной смолы 5, металлические плиты 1 и эбонитовые шпильки 2 воспринимали осевую силу, возникающую в резиновых трубках, предотвращая осевое смещение. Коэффициенты температурного расширения эбонита и материала модели примерно одинаковые, и поэтому при нагревании модели в термостате дополнительная осевая сила от изменения температуры не возникала.

Величину давления приняли равной 2,5 бар, исходя из механических свойств смолы при температуре «замораживания» и необходимости получения интерференционной картины с достаточным порядком изохром. Необходимая температура нагрева моделей (118°C) и режим испытания устанавливались дополнительными опытами.

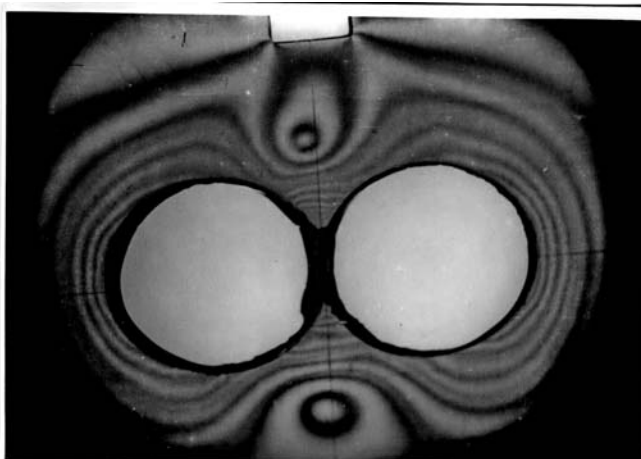
После испытания в термостате модели с «замороженной» интерференционной картиной разрезались на шлифы – пластинки толщиной 3–4 мм (рис. 4). Из 17 шлифов, вырезанных в поперечном направлении, подробно исследовались шлифы I, II, III, V, VI (рис. 5), а также продольные шлифы IV и VII. Для получения составляющих напряжений в объемной модели из каждого основного шлифа I–VII вырезались дополнительные пластинки сечением 3x3 мм (рис. 6). Основные и дополнительные шлифы исследовались на установках ППУ-7 и КСП-7. Просвечивание основного шлифа производилось по направлению оси z, а дополнительного – по направлению оси y.



**Рисунок 4. Схема разрезки модели на основные шлифы-пластинки; 1 – диафрагма**

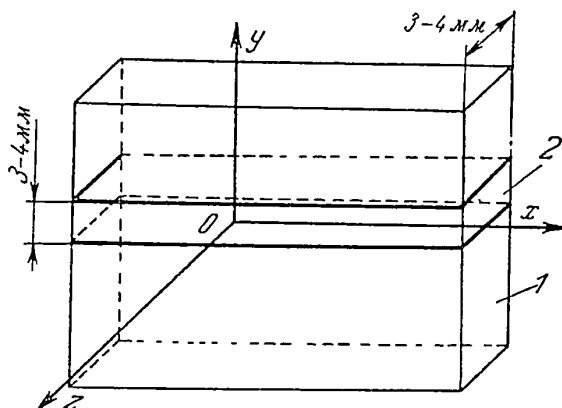
Разделение нормальных напряжений производилось по известному способу интегрирования в прямоугольных координатах [17]:

$$\sigma_x = \sigma_x^0 - \sum \left( \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} + \frac{\Delta \tau_{xz}}{\Delta z} \right) \Delta x. \quad (1)$$



**Рисунок 5. Картина полос (изохром) в шлифе V**

Распределение напряжений  $\sigma_x$  в исследуемом сечении получается путем последовательного суммирования. Величины  $\Delta \tau_{xy}$  и  $\Delta \tau_{xz}$  определялись по значениям  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{xz}$  во вспомогательных сечениях, расположенных по обе стороны от исследуемого основного на расстояниях  $\Delta y/2$  и  $\Delta z/2$ . Начало суммирования выбиралось там, где  $\sigma_x^0$  известно. Интегрирование велось прямым и обратным ходом с разгонкой получающейся невязки.



**Рисунок 6. Схема разрезки модели на дополнительные шлифы-пластинки; 1 – основной шлиф; 2 – дополнительный шлиф**

При просвечивании основных поперечных шлифов I, II, III, V и VI получались данные для определения  $\Delta\tau_{xy}$ ; дополнительные шлифы давали в этом случае  $\Delta\tau_{xz}$ .

Нормальные напряжения  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  определялись исходя из известных соотношений:

$$\sigma_x - \sigma_y = (\sigma_1^* - \sigma_2^*) \cos 2\varphi_{xy} \tag{2}$$

и

$$\sigma_x - \sigma_z = (\sigma_1^* - \sigma_3^*) \cos 2\varphi_{xz}, \tag{3}$$

откуда

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1^* - \sigma_2^*) \cos 2\varphi_{xy}, \tag{4} \quad \sigma_z = \sigma_x - (\sigma_1^* - \sigma_3^*) \cos 2\varphi_{xz},$$

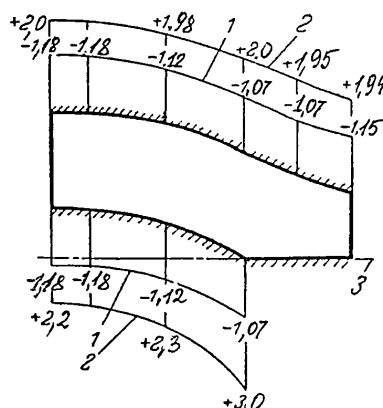
где  $\sigma_1^*$ ,  $\sigma_2^*$  и  $\sigma_3^*$  – так называемые квазиглавные напряжения, а  $\varphi$  – параметр изоклины в соответствующей плоскости.

Пересчет результатов модельных испытаний на натуру осуществлялся по формуле [15]:

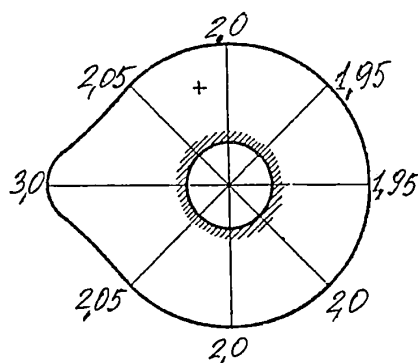
$$\sigma_H = \sigma_M \cdot \frac{q_H}{q_M}, \tag{5}$$

где  $\sigma$  – напряжения,  $q$  – давление в трубопроводе. Индексом «м» обозначены величины, относящиеся к модели, индексом «н» – к натурной конструкции.

Результаты представлены на рисунках 7 и 8.



**Рисунок 7. Эпюра распределения радиальных (1) и растягивающих тангенциальных (2) нормальных напряжений в бетонном массиве вдоль трубопровода, МПа; 3 – ось вилки**



**Рисунок 8. Эпюра распределения контрольных нормальных тангенциальных растягивающих напряжений в бетонном массиве в месте стыка трубопроводов (шлиф III – III), МПа**

Из этой части статьи можно сделать следующие выводы.

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

1. Наличие металлической облицовки трубопроводов лишь незначительно (с 1,287 до 1,18 МПа) уменьшает внутреннее давление, передаваемое на бетонный массив (рис. 7).

2. Растягивающие напряжения в бетонном массиве достигают наибольших значений по контакту с металлической облицовкой трубопроводов (2,0–2,2 МПа), причем эти напряжения практически постоянны по длине трубопроводов вплоть до места их стыка, где они достигают величины 3,0 МПа (рис. 8).

3. Наличие металлической диафрагмы снижает передачу внутреннего давления на бетонный массив вилки только в сечениях, совпадающих с плоскостью диафрагмы и близких к ней.

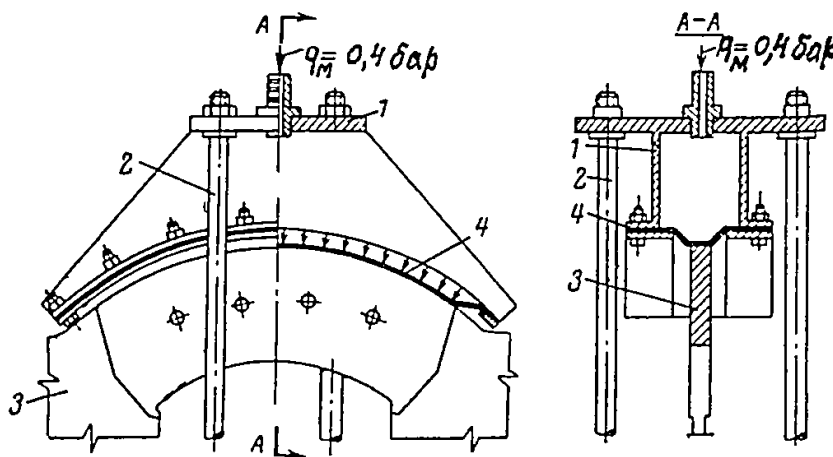
### **Толстые арки, упруго защемленные в торцах и ослабленные рядом круговых отверстий**

Модели изготавливались из эпоксидной смолы ЭД-16 в масштабе 1:1000. Моделирование различной жесткости сооружения и основания осуществлялось различной толщиной арки и скального основания, пропорциональной модулям нормальной упругости бетона и скалы. Модуль упругости скального основания принимался в 2 раза меньшим модуля упругости бетона сооружения. Как показали проведенные исследования, объемностью напряженного состояния в местах перехода толщин можно пренебречь, что подтверждалось плавностью и непрерывностью полей изохром в этих местах.

По условиям работы сооружения исследованию подлежали следующие типы моделей (нагрузка во всех случаях – равномерно распределенное давление на внешнюю грань):

- М-1 – арка I, в отверстиях давление отсутствует;
- М-2 – арка II, в отверстиях давление отсутствует;
- М-3 – арка II, во всех четырех отверстиях имеется давление;
- М-4 – арка II, в двух крайних отверстиях имеется давление.

Нагружение моделей, помещенных в термостат для «замораживания» деформаций, осуществлялось с помощью специально сконструированного для этой цели устройства (рис. 9), принцип действия которого следующий. Компрессором нагнетался воздух в полость загрузочной камеры 1, установленной на шпильках 2 над моделью 3. В части, которая прилегала к модели, загрузочная камера имела щель, герметически закрытую эластичной резиной 4. Под воздействием сжатого воздуха резина деформировалась и вплотную прилегала к модели, осуществляя равномерное давление по всей внешней грани.



**Рисунок 9. Устройство для загрузки моделей**

При испытании моделей М-3 и М-4 равномерно распределенное давление прикладывалось не только на внешнюю грань, но и в отверстиях, для чего использовалось дополнительное устройство. В отверстие модели пропускалась эластичная резиновая трубка с наружным диаметром 5 мм. С одного конца на трубку ставилась металлическая заглушка, а другой ее конец надевался на медную трубку, куда подавался сжатый воздух. При подаче воздуха резиновая трубка плотно прилегала к поверхности отверстия, осуществляя равномерно распределенное давление.

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

Величина давления была принята равной 0,3–0,4 бар, исходя из предела пропорциональности смолы ЭД-16 при температуре «замораживания» и необходимости получения интерференционной картины с достаточным порядком изохром.

Затем модели с «замороженной» интерференционной картиной (рис. 10) исследовались на поляризационно-оптических установках ППУ-7 и КСП-5, где измерялись параметры изоклин и изохром (оптическая разность хода). Разделение нормальных напряжений в исследуемых сечениях производилось путем численного интегрирования в прямоугольных координатах по формулам (1), (2) и (4).

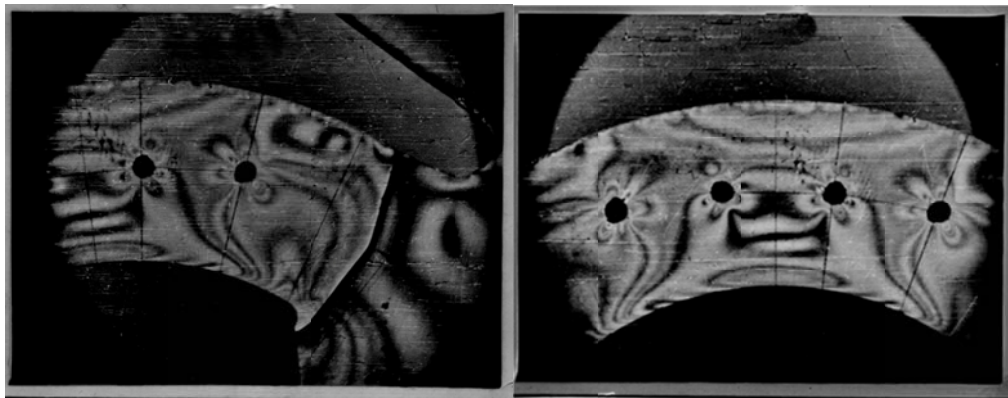


Рисунок 10. Картина полос (изохром) в моделях М-3 и М-4

Для определения коэффициента оптической активности материала в условиях «замораживания» одновременно с испытанием моделей были проведены испытания эталонного образца – диска, сжатого по диаметру двумя сосредоточенными силами.

Пересчет напряжений в натуру производился по формуле (5), причем  $q$  – давление на напорную грань.

Для проверки точности эксперимента рассматривались условия равновесия отсеченных исследуемыми сечениями частей сооружения; производилась также проверка условий равновесия элементов, выделенных в окрестности точек пересечения исследуемых сечений (так называемое микроравновесие). Полученные в результате проверки наибольшие расхождения не превышали 4–5%, что указывает на достаточную точность полученных экспериментальных данных.

Напряжения определялись в характерных сечениях моделей, указанных на рисунке 2, и по контурам отверстий, а также по внешней и внутренней граням арок.

Сечения 0-0, 1-1, 2-2 и 3-3 проведены по радиальным прямым, причем сечения 1-1 и 2-2 проходят через центры отверстий; сечение 3-3 расположено под углом, отстоящим от защемления

на  $\frac{1}{30}\alpha$ .

По исследованным сечениям были построены эпюры напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  (рис. 11–13) и  $\tau_{xy}$  (ось  $x$  всюду была направлена вдоль исследуемого сечения).



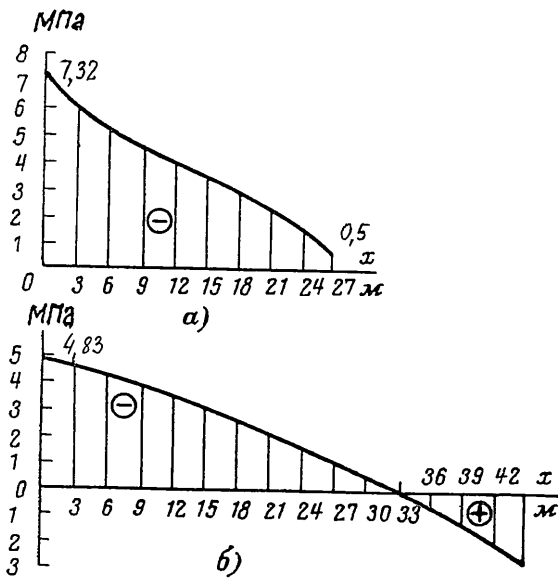


Рисунок 11. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  в ключевом сечении 0-0; а – арка I; б – арка II

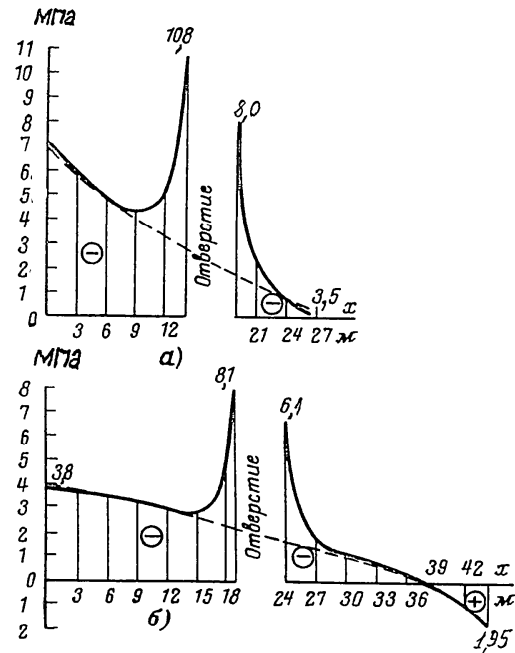


Рисунок 12. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  в сечении 1-1; а – арка I; б – арка II. Пунктиром обозначены напряжения, подсчитанные по элементарной теории кривого бруса

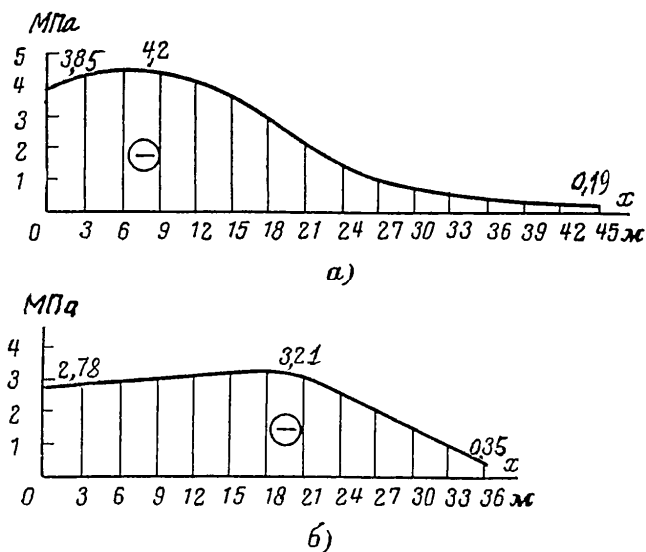


Рисунок 13. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  в скальном основании (сечение 7-7) вблизи пяти арок; а – арка I; б – арка II

Сопоставление тангенциальных напряжений, полученных по элементарной теории кривого бруса и найденных экспериментальным путем при наличии отверстия, показывает ярко выраженный местный характер концентрации напряжений около отверстия.

Как видно из рисунка 14, напряжения  $\sigma_y$  вдоль внутренней грани арки I всюду сжимающие, а в средней части арки II имеют место растягивающие напряжения на дуге с центральным углом, равным примерно половине внутренней дуги арки. При отсутствии внутреннего давления в отверстии вокруг него возникает значительная концентрация напряжений (рис. 15). Эпюра симметрична относительно оси, пересекающей центр отверстия под углом, примерно равным  $30^\circ$ , к радиальному сечению 2-2; наибольшие сжимающие напряжения получаются на этой оси со стороны внешней грани арки.

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

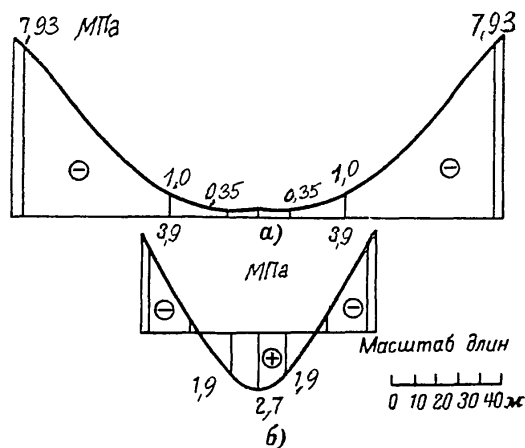


Рисунок 14. Графики изменения напряжений  $\sigma_y$  вдоль внутренней грани арок; а – арка I; б – арка II

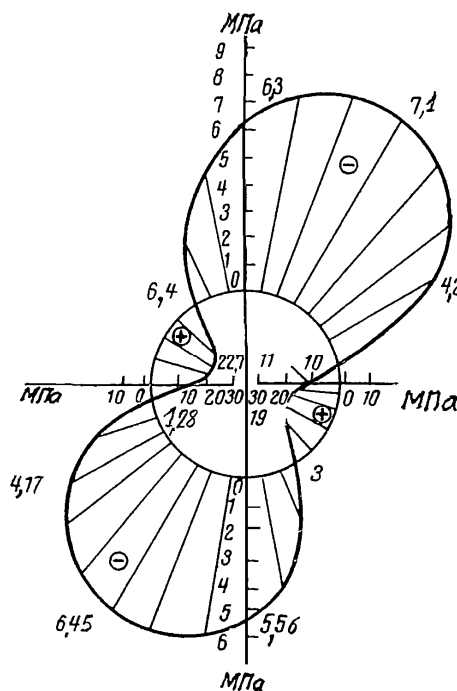


Рисунок 15. Эпюра напряжений по контуру отверстия в сечении 2-2 в арке II при отсутствии давления в отверстии (верхний бьеф в верхней части рисунка)

На контуре отверстия имеет место зона растяжения, причем наибольшие растягивающие напряжения возникают на радиальной прямой, перпендикулярной оси симметрии. Смещение оси симметрии эпюры относительно сечения 2-2 вызвано наличием значительной поперечной силы. Напряжения по контуру отверстий в сечении 1-1 арки II и в сечениях 1-1 и 2-2 арки I имеют тот же характер, но ось симметрии эпюры почти совпадает с радиальным сечением.

Напряжения  $\sigma_x$  во всех исследованных сечениях арок сжимающие, и величина их примерно равна  $q$ . Напряжения  $\tau_{xy}$  достигают максимального значения, примерно равного  $1,54 q$  в арке II.

Напряжения по контуру отверстий, найденные экспериментальным путем, сопоставлялись с напряжениями, вычисленными с помощью МКЭ на базе программного комплекса NASTRAN [28].

Таблица 2. Коэффициенты концентрации напряжений около отверстий

Арки	I		II	
Сечения	1-1	2-2	1-1	2-2
По экспериментальным данным	3,26	3,30	3,62	3,42
По расчету МКЭ [28]	3,21	3,23	3,50	3,28

Коэффициент концентрации напряжений (ККН) подсчитывался по формуле

$$KKN = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}, \tag{6}$$

где  $\sigma_{\max}$  – наибольшие напряжения  $\sigma_y$  на контуре отверстия;  $\sigma_n$  – номинальное напряжение  $\sigma_y$  в соответствующих точках поперечного сечения арки при отсутствии отверстия.

Таблица 3. Значения отношений наибольшего напряжения на контуре отверстия к наибольшему напряжению в арке в данном сечении при отсутствии отверстия

Арки	I		II	
Сечения	1-1	2-2	1-1	2-2
По экспериментальным данным	1,54	1,82	2,15	2,19
По расчету МКЭ [28]	1,49	1,78	2,08	2,14

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

Величины, приведенные в таблице 3, дают возможность судить об опасности наличия отверстия и о его влиянии на прочность арки.

Выводы по данной части статьи.

1. В арке I напряжения  $\sigma_y$  сжимающие. Со стороны верховой грани они достигают наибольшей величины в ключевом сечении 0-0 (8,35q), а со стороны низовой грани – в сечении у основания 3-3 (9q).

2. В арке II при отсутствии давления в отверстиях (модель М-2) со стороны внутренней грани имеют место растягивающие напряжения  $\sigma_y$ , достигающие при заданном внешнем давлении наибольшей величины в ключевом сечении 0-0 (3q). Со стороны внешней грани максимальные сжимающие напряжения в ключевом сечении равны 5,3q.

3. Около отверстий возникает значительная концентрация напряжений. Сжимающие напряжения на контуре достигают величины 12,8q в арке I и 9,8q в арке II при отсутствии давления в отверстиях. Максимальные растягивающие напряжения у контура отверстия равны 3q в арке I и 2,5q в арке II. Следует отметить быстрое затухание концентрации напряжений; зона растяжения распространяется примерно на расстоянии 1,4r от контура отверстия.

4. Сопоставление экспериментальных данных о распределении напряжений около круговых отверстий с соответствующими напряжениями, подсчитанными для арки без отверстий, позволяет сделать заключение о том, что взаимное влияние отверстий при заданном их расположении незначительно.

5. В скальном основании сооружения вблизи пят арки I имеют место сжимающие напряжения, максимальная величина которых составляет 4,8q. В основании арки II сжимающие напряжения достигают величины 3,5q.

6. Наличие равномерно распределенного давления внутри отверстий изменяет напряженное состояние арки II только вблизи отверстий, причем сжимающие напряжения на контуре уменьшаются, а растягивающие увеличиваются до 3,5q.

### Заключение

Полученные в процессе исследования основные результаты состоят в следующем.

1. Разработана методика моделирования и исследования напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений методом футоупругости в соответствии с их конструктивными особенностями и условиями нагружения. В частности, предложен способ моделирования соотношения жесткостей бетонного массива и стального трубопровода, а также бетонной плиты и скального основания.

2. По результатам экспериментального исследования установлены некоторые закономерности напряженного состояния рассмотренных конструкций, являющиеся важными с точки зрения проектирования и обеспечения надежной безопасности работы сооружения.

3. Проиллюстрирована эффективность экспериментального метода фотоупругости для исследования напряженного состояния конструкций сложной формы при наличии концентрации напряжений.

### Литература

1. СП58.13330.2011 «СНиП 33-01-2003 Гидротехнические сооружения. Основные положения». М., 2004.
2. Законопроект №38528-5 Технический регламент «О безопасности гидротехнические сооружений электрических станций».
3. Махутов Н.А., Ушаков Б.Н. Развитие методов экспериментальной механики // Заводская лаборатория. 2003. Т.69. №5. С. 45–51.
4. Гидроэнергетика / Под ред. В.И. Обрезкова. М.: Энергоатомиздат, 1968.
5. Аршеневский Н.Н. Гидроэлектрические станции: Учеб. для гидротехн. спец. вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 464 с.
6. Фрейшист А.Р., Хохарин А.Х., Шор А.М. Стальные трубопроводы гидроэлектростанций. М.: Энергоиздат, 1982. 247 с.
7. Михайлов И.Е. Станционные стальные трубопроводы ГЭС и ГАЭС: Учебное пособие. М.: МГСУ, 2010. 93 с.

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений

8. Вайнберг А.И. Оценка нормативного риска возникновения аварий на бетонных плотинах // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2008. Т. 250. С. 108–119.
9. Марчук А.Н. Влияние береговых массивов со стороны верхнего бьефа в примыканиях арочных плотин на их напряжённо-деформированное состояние // Гидротехническое строительство. 2010. №12. С. 33–36.
10. Фам Ван Хунг, Мглобелов Ю.Б. Обоснование надёжности арочной плотины Нам Чиен во Вьетнаме // Гидротехническое строительство. 2008. №1. С. 21–36.
11. Марчук А.Н., Манько А.В. Геодинамическое воздействия на высокие бетонные плотины // Вестник МГСУ. 2010. №4. С.138–141.
12. Рассказов Л.Н., Нгуен Куанг Кыюнг. Влияние направления сейсмического воздействия на напряжения в арочных плотинах // Гидротехническое строительство. 2006. Т. 40. №6. С. 337–341.
13. Pan J., Jin F., Xu Y., Wang J. Analysis of dam heel cracking and ultimate bearing capacity of kölnbrein arch dam // Journal of Hydroelectric Engineering. 2010. Vol. 29. No. 3. Pp.148–153.
14. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
15. Киселёв А.П. Высокоточные конечные элементы в расчетах прочности и устойчивости арочных бетонных плотин // Аграрная наука. 2004. №6. С. 28.
16. Воскресенский С.М., Юркевич Б.Н. Обеспечение надёжности и безопасности гидроэлектростанций после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года (сообщение на пятой научно-технической конференции: Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии) // Гидротехническое строительство. 2011. №4. С. 49–52.
17. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.
18. Кошеленко А.С., Поздняк Г.Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. М.: Издательский дом «Граница», 2004. 296 с.
19. Метод фотоупругости. В 3 т. / Под общей ред. Г.Л.Хесина. М.: Стройиздат, 1975. Т. 1, 460 с. Т. 2, 368 с. Т. 3, 321 с.
20. Касаткин Б.С., Кудрин А.В. [и др.] Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. 583 с.
21. Фриштер Л.Ю. Расчётно-экспериментальный метод исследования НДС составных конструкций в зонах концентрации напряжений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. №2. С. 20–27.
22. Ramesh K., Kasimayan T., Neethi Simon B. Digital photoelasticity – A comprehensive review// Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2011. Vol. 46(4). Pp. 245–266.
23. Rakmesh K. Digital photoelasticity: Advanced Techniques and Applications. Berlin–Heidelberg: Springer, 2000. 410 p.
24. Patterson E.A. Digital photoelasticity: principles, practice and potential // Strain. 2002. Vol. 38. No. 1. Pp. 27–39.
25. Smith Neto, P., Palma E.S., Figueiredo Bicalho, V.M. Stress analysis in automobile components using reflexive photoelasticity technique // Applied Mechanics and Materials. 2006. Vol. 5–6. Pp. 117–124.
26. Patterson E., Brailly P., Tanori M. High frequency quantitative photoelasticity applied to jet engine components // Experimental Mechanics. 2006. Vol. 46. No. 6. Pp. 661–668.
27. Alejandra A. Silva-Moreno, Ornelas Rodrigues F.J., Rikardo Gutierrez Torres, Noe Alcala Ochoa. Photoelasticity applied in industry // Proceedings of SPIE 6046, Fifth Symposium Optics in Industry, February 10, 2006. No. 604619.
28. Шишкович Д.Г. Расчет конструкций в MKS.visialNastran for Windows. М.: ДМК пресс, 2004. 704 с.

*Сергей Николаевич Эйгенсон, Санкт-Петербург, Россия  
+7(911)712-47-61; эл. почта: sopromat.eigenson@yandex.ru*

*Николай Васильевича Корихин, Санкт-Петербург, Россия  
+7(911)918-61-06; эл. почта: Kor440@mail333.com*

*Александр Иванович Головин, Санкт-Петербург, Россия  
+7(921)753-80-26; эл. почта: gai422@mail.ru*

© Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И., 2014

doi: 10.5862/MCE.45.7

## Experimental Investigation considering the Stressed State of some Essential Constructions of Large Hydropower Buildings

**S.N. Eigenson**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia*  
+7(911)712-47-61; e-mail: [sopromat.eigenson@yandex.ru](mailto:sopromat.eigenson@yandex.ru)

**N.V. Korikhin**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia*  
+7(911)918-61-06; e-mail: [Kor440@mail333.com](mailto:Kor440@mail333.com)

**A.I. Golovin**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia*  
+7(921)753-80-26; e-mail: [gai422@mail.ru](mailto:gai422@mail.ru)

### Key words

fork of pressure pipeline; arch with holes; photoelasticity method; modeling of deformation "freezing"; stressed state; stress concentration

### Abstract

The article is concerned with the experimental investigation considering the stressed state of essential constructions of hydropower buildings: the pressure pipeline "fork" of large hydropower unit and elastically restrained heavy arches weakened with round holes.

The precise knowledge of the stress-strain state (SSS) of the structure during the design phase is essential to the construction's durability. Analytical methods of calculations, including numerical ones (e.g. finite element method - FEM), are being developed and improved. Experimental methods for studying the stress-strain state of structures on models complement the analytical calculations and combine with them effectively.

The research was carried out by the method of photoelasticity "freezing" of deformations using the ability of epoxide polymers to maintain the constant optical anisotropy, caused with loading of the model, after unloading. The results allowed to specify the stress distribution in significant critical structural sections, to evaluate the reliability of estimates of stress concentrations by the holes in arches, fulfilled by finite-element method.

### References

1. SP58.13330.2011 «SNiP 33-01-2003. *Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya. Osnovnyye polozheniya*» [Set of rules 58.13330.2011 "Building code 33-01-2003. Hydrotechnical structures. Basic provisions"]. Moscow, 2004. (rus)
2. *Zakonoprojekt №38528-5 Tekhnicheskij reglament «O bezopasnosti gidrotekhnicheskiye sooruzheniy elektricheskikh stantsiy»* [The draft law No. 38528-5. Technical Regulations "On the safety of hydraulic structures of power plants"]. Economics and Life. Moscow 16.06.2010. Pp.1–17. (rus)
3. Makhutov N.A., Ushakov B.N. *Zavodskaya laboratoriya*. 2003. Vol. 69. No.5. Pp. 45–51. (rus)
4. *Gidroenergetika / Pod red. V.I. Obrezkova* [Hydropower engineering. Edited by V.I. Obrezkov]. Moscow: Energoatomizdat, 1968. Pp. (rus)
5. Arshenevskiy N.N. *Gidroelektricheskiye stantsii: Ucheb. dlya gidrotekhn. spets. vuzov* [Hydroelectric power stations: Tutorial for hydraulic engineering universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. Pp. (rus)
6. Freyshist A.R., Khokharin A.Kh., Shor A.M. *Stalnyye truboprovody gidroelektrostantsiy* [Steel pipes of hydroelectric power plants]. Moscow: Energiya, 1982. Pp. (rus)
7. Mikhaylov I.Ye. *Stantsionnyye stalnyye truboprovody GES i GAES* [Steel pipelines of hydropower and hydroelectric pumped storage power stations]. Moscow: MGSU, 2010. 93 p. (rus)
8. Vaynberg A.I. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva*. 2008. Vol. 250. Pp. 108–119. (rus)
9. Marchuk A.N. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2010. No.12. Pp. 33–36. (rus)
10. Fam Van Khung, Mgalobelov Yu.B. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2008. No.1. Pp. 21–36. (rus)

Eigenson S.N., Korikhin N.V., Golovin A.I. Experimental investigation considering the stressed state of some essential constructions of large hydropower buildings

11. Marchuk A.N., Manko A.V. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2010. No.4. Pp.138–141 (rus)
12. Rasskazov L. N., Nguyen Kuang Kyung. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2006. Vol. 40. No.6. Pp.337–341 (rus)
13. Pan J., Jin F., Xu Y., Wang J. Analysis of dam heel cracking and ultimate bearing capacity of kölnbrein arch dam. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2010. Vol. 29. No.3. Pp.148–153
14. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. [Method of finite elements. Basics.]. Translated from English. Moscow: Mir, 1984. 428 p. (rus)
15. Kiselev A.P. *Agrarian science*. 2004. No.6. P. 28. (rus)
16. Voskresenskiy S.M., Yurkevich B.N. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2011. No.4. Pp. 49–52. (rus)
17. Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. *Polyarizatsionno-opticheskiye metody mekhaniki deformiruyemogo tela* [Polarization-optical methods of deformable body mechanics]. Moscow: Nauka, 1973. 576 p. (rus)
18. Koshelenko A.S., Pozdnyak G.G. *Teoreticheskiye osnovy i praktika fotomekhaniki v mashinostroyenii* [Theoretical bases and practice of photographic equipment in mechanical engineering]. Moscow: Izdatelskiy dom «Granitsa», 2004. 296 p. (rus)
19. *Metod fotouprugosti* [Photoelasticity method]. Under the general editorship of Hesin G.L. Vol. 1–3. Moscow: Stroyizdat, 1975. Vol. 1., 460 p. Vol. 2., 368 p. Vol. 3., 321 p. (rus)
20. Kasatkin B.S., Kudrin A.V. [et al]. *Eksperimentalnyye metody issledovaniya deformatsiy i napryazheniy* [Experimental methods for studying the deformation and stress]. Kiev: Naukova Dumka, 1981. 583 p. (rus)
21. Frishter L.Yu. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2008. No.2. Pp. 20–27. (rus)
22. Ramesh K., Kasimayan, T., Neethi Simon, B. Digital photoelasticity – A comprehensive review. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2011. No.46(4). Pp. 245–266.
23. Ramesh K. *Digital photoelasticity: Advanced Techniques and Applications*. Berlin–Heidelberg: Springer, 2000. 410 p.
24. Patterson E.A. Digital photoelasticity: principles, practice and potential. *Strain*. 2002. No.38(1). Pp. 27–39.
25. Smith Neto, P., Palma E.S., Figueiredo Bicalho V.M. Stress analysis in automobile components using reflexive photoelasticity technique. *Applied Mechanics and Materials*. 2006. No.5–6. Pp. 117–124.
26. Patterson, E., Brailly, P., Tanori, M. High frequency quantitative photoelasticity applied to jet engine components. *Experimental Mechanics*. 2006. No.46(6). Pp. 661–668.
27. Alejandra A. Silva-Moreno, Ornelas Rodrigues F.J., Rikardo Gutierrez Torres, Noe Alcala Ochoa. Photoelasticity applied in industry. Proc. SPIE 6046, Fifth Symposium Optics in Industry, 604619 (February 10, 2006).
28. Shishkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MKS* [Structural analysis in MKS]. Moscow: DMKpress, 2004. 704 p. (rus).

**Full text of this article in Russian: pp. 59–70**