



# ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ежемесячный  
научно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РФ,

ОАО «РУСГИДРО»,

АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,

ЗАО НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,

НП «НТС ЕЭС»

Основан в 1930 г.

№ 2

февраль

2013

## Содержание

### Проектирование, строительство, эксплуатация

**Абубакиров Ш. И., Луначи М. Э., Плотникова Т. В., Сокур П. В., Тузов П. Ю., Шаварин В. Н., Шакарян Ю. Г., Щур В. А.** Оптимизация работы гидротурбины посредством применения переменной частоты вращения. . . . . 2

### Расчеты, исследования, эксперименты

**Белаш И. Г.** Гидромеханический расчет размеров спиральных камер с безмоментным сопряжением их оболочек со статором. . . . . 9

**Васин А. В., Тимофеева О. А.** Моделирование зон вихревых течений в обводных галереях шлюзовых камер . . . . . 17

**Саинов М. П.** Исследование устойчивости откоса плотины по пространственным поверхностям скольжения . . . . . 22

### Дискуссии

**Кудрявый В. В.** Системные причины аварий . . . . . 29

**Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Соловьев Ф. Л., Голованова Е. Ю.** Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока. . . . . 38

**Асарин А. Е., Жиркевич А. Н.** Рецензия на статью В. В. Коваленко, Е. В. Гайдуковой, Ф. Л. Соловьева и Е. Ю. Головановой “Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока”. . . . . 44

**Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Соловьев Ф. Л., Голованова Е. Ю.** Комментарии к рецензии на статью “Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока”. . . . . 45

**Виноградов Ю. Б.** Об одной вряд ли оправданной бифуркации гидролого-стохастической идеи . . . . . 47

**Асарин А. Е.** Рецензия на статью Ю. Б. Виноградова “Об одной вряд ли оправданной бифуркации гидролого-стохастической идеи” . . . . . 50

**Поздравление Г. Г. Ольховскому** . . . . . 51

**Поздравление В. Н. Жиленкову** . . . . . 52

**Поздравление А. А. Романову** . . . . . 53

### Хроника

**Шилин М. Б.** Морские берега — эволюция, экономика, экология и дреджинг . . . . . 54

**Новости гидроэнергетики и гидротехники** . . . . . 59

**Асарин А. Е.** Инновационные подходы к мировым вызовам . . . . . 62

**Памяти В. Д. Костюкова** . . . . . 64

## Оптимизация работы гидротурбины посредством применения переменной частоты вращения

Абубакиров Ш. И. (ОАО “Корпорация Энергомашэкспорт”),  
Лунаци М. Э. (ОАО “РусГидро”), Плотникова Т. В., Сокур П. В.,  
Тузов П. Ю. (ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС”), Шаварин В. Н. (ОАО “НИИЭС”),  
Шакарян Ю. Г. (ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС”), Щур В. А. (ОАО “НПО ЦКТИ”)

Рассматриваются режимы работы гидроагрегата с реактивной гидротурбиной при переменной частоте вращения. Приводятся методика анализа режимов работы гидроагрегатов с переменной частотой вращения и алгоритм управления гидроагрегатом, позволяющий реализовать преимущества от работы с переменной частотой вращения: возможность повышения эффективности работы гидротурбины, расширение мощностного диапазона работы за счет снижения гидродинамических воздействий на гидроагрегат. Теоретические положения подтверждаются результатами компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** алгоритм управления гидроагрегатом, переменная частота вращения, регулирование мощности.

**Постановка задачи.** Достигнутый сегодня максимальный уровень КПД гидротурбин очень высок. Для осевых машин он составляет 94 – 95 %, а для радиально-осевых достигает 96 – 97 %. Однако этот высокий уровень имеет место только для ограниченной зоны режимов турбин. Реальные машины эксплуатируются, как правило, в очень широком диапазоне изменений напоров и мощности. Поэтому для повышения эффективности использования водотока надо стремиться к работе с высоким КПД машины во всем массиве режимов ее работы. Работа гидроагрегата с высоким значением КПД может быть достигнута посредством применения переменной частоты вращения агрегата.

Второй важной проблемой гидротурбостроения является расширение регулировочного мощностного диапазона машин с жесткозакрепленными лопастями (радиально-осевые и пропеллерные турбины). На оптимальных по КПД режимах за рабочим колесом абсолютная скорость потока имеет только осевое направление. Кинетическая энергия потока в этом случае преобразуется отсасывающей трубой в дополнительное разрежение под рабочим колесом, что приводит к увеличению напора турбины. На частичных мощностях появляется окружная составляющая скорости (проекция абсолютной скорости на окружную), которая вызывает закрутку потока за рабочим колесом. Скоростная энергия не восстанавливается отсасывающей трубой и идет на вредное воздействие. Сходящий с выходных кромок лопастей закрученный поток сливается за рабочим колесом в один мощный концентрированный “жгут”, который обязательно замыкается на стенках отсасывающей трубы. Основные неприятности на режимах с “жгутовыми” пульсациями потока связаны с большими перемещениями рабочего

колеса, что может приводить к его задеванию за камеру. Поэтому работа гидротурбин на неблагоприятных гидравлических режимах запрещена. Соответствующее ограничение на работу турбины с частичными мощностями задается заводом-изготовителем оборудования на эксплуатационной характеристике  $H - N_T$ . Эта проблема также может решаться путем применения переменной частоты вращения, но требует соответствующего проектирования лопастных систем.

Повышенный интерес к использованию генераторов с переменной частотой вращения проявляется при эксплуатации обратимых гидромашин, получивших широкое распространение за рубежом. Оптимумы по КПД насосного и турбинного режимов этих машин различны. Переменная частота вращения может позволить работать в обоих режимах с максимальным уровнем КПД [1, 2].

Использование переменной частоты вращения позволяет решить такие задачи, как устранение кавитационных ограничений номинальной мощности турбин, отстройка от резонансных явлений в гидроагрегате.

Из разнообразного типа электрических машин, работающих с переменной частотой вращения, наиболее экономичным техническим решением при диапазонах изменения частоты вращения, не превышающих  $\pm 20\%$  от синхронной, является асинхронизированная машина, что подтверждается мировой практикой их применения [3].

В статье приводится методика анализа режимов работы гидроагрегатов с переменной частотой вращения и предлагается алгоритм управления гидроагрегатом, позволяющий реализовать преимущества от работы с переменной частотой вращения. На основе предложенного алгоритма управления раз-

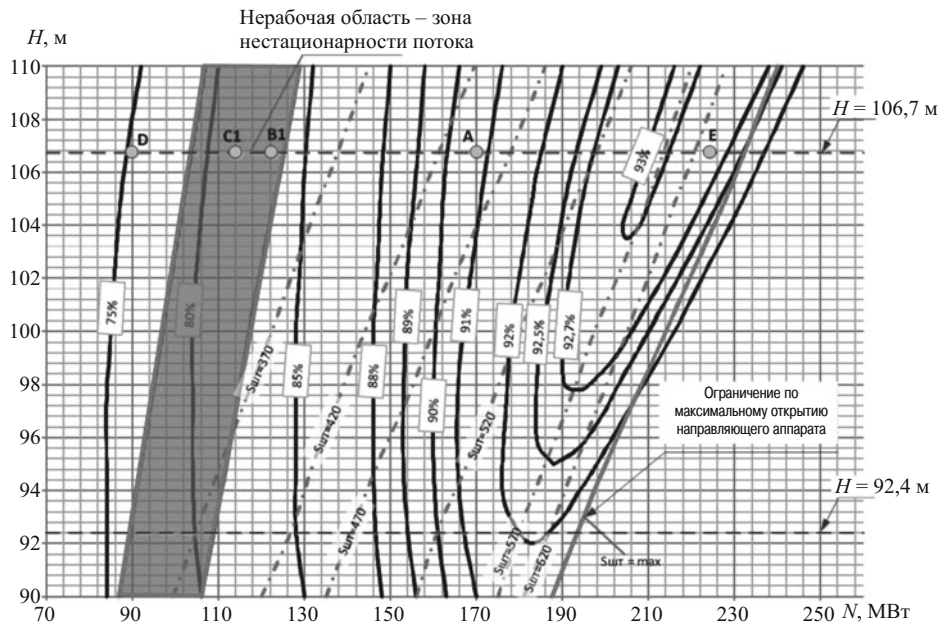


Рис. 1. Исходная эксплуатационная характеристика  $n = 150$  об/мин

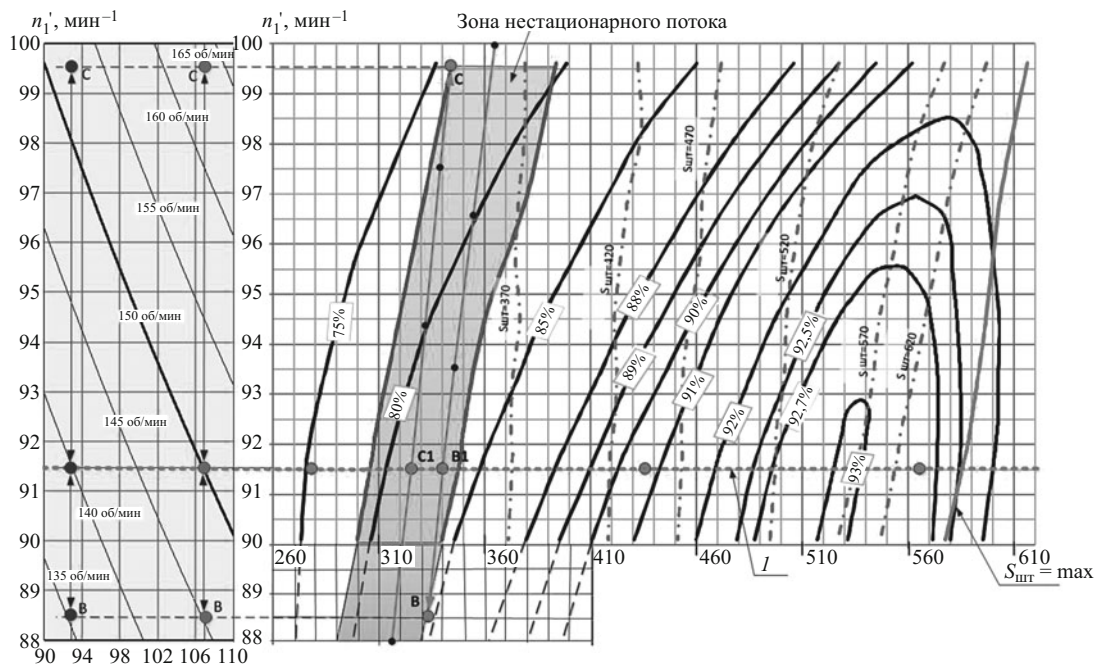


Рис. 2. Универсальная характеристика

работан регулятор, оптимизирующий режим работы агрегата. В статье приводятся результаты расчетов режимов работы гидроагрегата с этим регулятором на компьютерной модели. Исследования проводились на примере обратимой гидромашины РОНТ-115 Круонисской ГАЭС (четыре гидроагрегата, ввод в эксплуатацию 1992 – 1998 гг.). Мощность гидротурбины 233 МВт, диаметр рабочего колеса 6,3 м, рабочий диапазон напоров  $90 \leq H \leq 110$  м, синхронная частоты вращения 150 об/мин.

**Методика анализа режимов работы гидроагрегата с переменной частотой вращения.** На

рис. 1 приведена эксплуатационная характеристика гидромашины РОНТ-115  $H(N)$  при постоянной частоте вращения  $n = 150$  об/мин. Задание на мощность гидроагрегата задается оператором. Точками А, В1, С1, D, Е обозначены некоторые режимы работы при расчетном напоре  $H = 106,7$  м. На эксплуатационной характеристике отмечена запрещенная зона — зона нестационарности потока (повышенных вибраций гидроагрегата). Режимы, помеченные на рис. 1 точками А, D, Е, находятся в рабочей области характеристики, а режимы соответствующие точкам В1 и С1, располагаются в нерабочей зоне эксплуатационной характеристики.

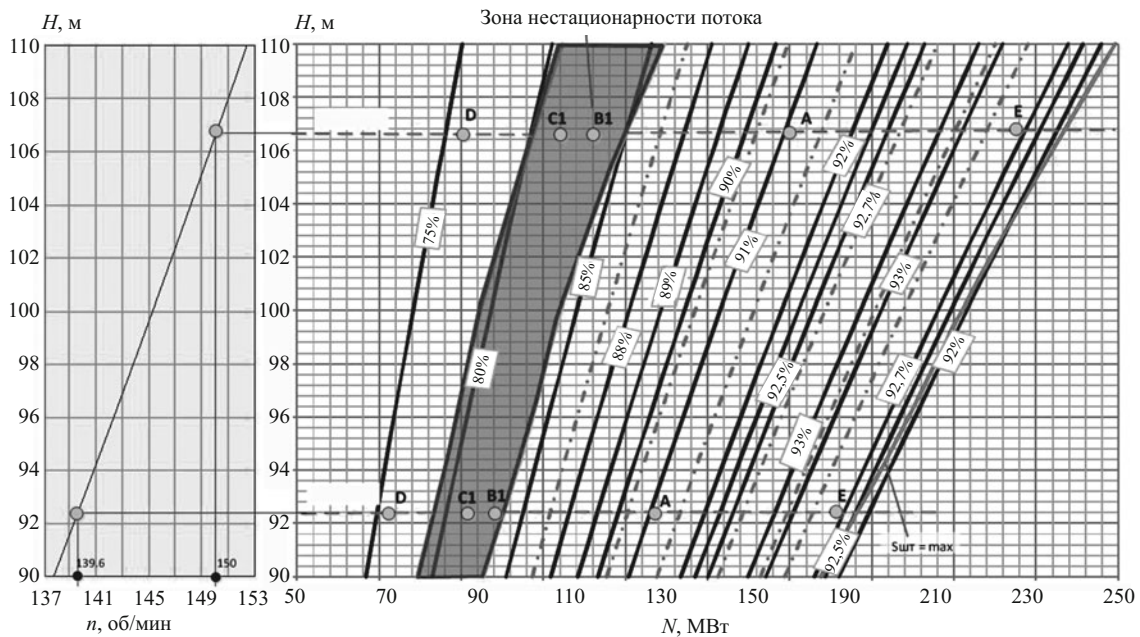


Рис. 3. Эксплуатационная характеристика при  $n' = 91,5$  об/мин

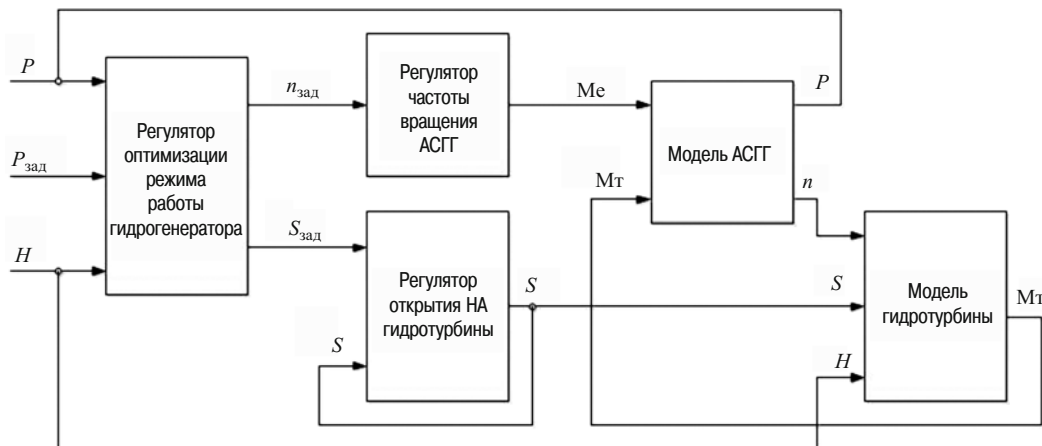


Рис. 4. Блок-схема модели

Коррекция режимов В1, С1 при постоянной частоте вращения гидроагрегата возможна только за счет уменьшения/увеличения заданного значения мощности и выхода за границы диапазона  $104 \leq N_{\text{зад}} \leq 126$  МВт — работа гидроагрегата в этом диапазоне мощностей запрещена.

На рис. 2 приведена универсальная характеристика, построенная в соответствии с эксплуатационной характеристикой, и обозначена зона нестационарности потока. При  $H = 106,7$  м и  $n = 150$  об/мин приведенное значение частоты вращения  $n_1' = 91,5$  об/мин. На универсальной характеристике рис. 2 нанесены точки А, В1, С1, D, Е, соответствующие одноименным режимам работы гидроагрегата на эксплуатационной характеристике рис. 1.

Параметры номинального режима работы гидромашин выбираются таким образом, чтобы при расчетном напоре и расчетной мощности значение КПД было бы максимальным. Этому режиму соответствуют оптимальные значения приведенной частоты вращения и приведенного расхода на универсальной характеристике.

Регулирование мощности гидроагрегата достигается путем регулирования расхода. При этом желательно осуществлять работу агрегата с максимально возможным КПД.

В плоскости приведенных параметров оптимальная зависимость  $n_1'(Q_1')$  может иметь различный характер, обусловленный типом турбины и условиями ее работы. В частном случае эта зависимость имеет вырожденный вид  $n_1'_{\text{опт}} = \text{const}$ . В данной статье рассмотрим именно такой случай.



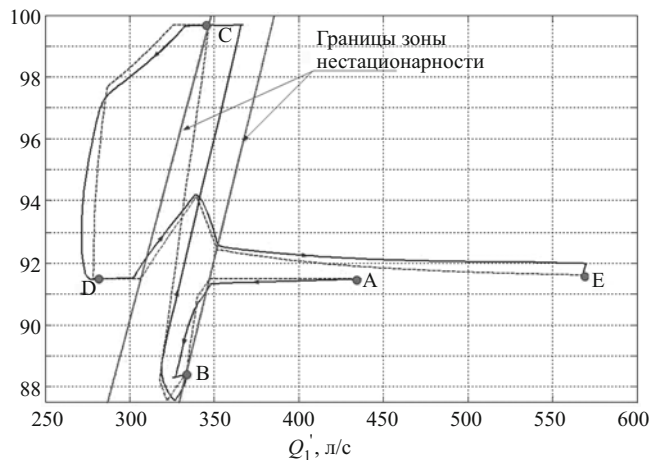


Рис. 5. Годограф изменения режима работы гидроагрегата, регулирование мощности

Примем за оптимальное значение  $n_{1' \text{ опт}} = 91,5$  об/мин (линия 1 на рис. 2). При регулировании мощности гидромашин для всех режимов, геометрическим местом которых является линия 1, обеспечиваются значения КПД, близкие к оптимальному. Исходя из теории подобия режимов работы гидроагрегата [4], при определенных условиях, при всех рабочих значениях напоров возможна работа с оптимальным значением приведенной частоты вращения  $n_1' = n_{1' \text{ опт}}$ . При  $n_1' = n_{1' \text{ опт}} = \text{const}$  для каждого рабочего значения напора  $H$  условие подобия режимов выполняется при регулировании

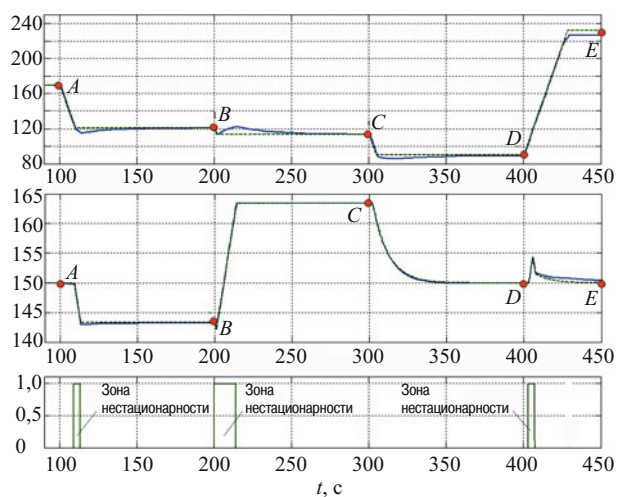


Рис. 6. Режимы работы гидроагрегата,  $H = 106,7$  м, регулирование мощности

натурной частоты вращения гидроагрегата в соответствии с выражением

$$n = \frac{n_1' \sqrt{H}}{D}. \quad (1)$$

На рис. 3 приведена эксплуатационная характеристика  $H(N_T)$ , построенная при  $n_1' = n_{1' \text{ опт}} = 91,5$  об/мин. Из сравнения рис. 1 и рис. 3 видно, что изолинии КПД приобрели качественно новый характер. Стала возможной работа гидроагрегата с

#### Режимы работы гидроагрегата

$H, \text{ м}$	Заданный режим работы, $n_1'_{\text{ зад}} = n_{1' \text{ опт}}$ (по рис. 2)						Оптимизированный режим работы (получен по результатам моделирования)					
	$N_{\text{ зад}}, \text{ МВт}$	$n_1'_{\text{ зад}}, \text{ об/мин}$	$Q_1'_{\text{ зад}}, \text{ л/с}$	$n_{\text{ зад}}, \text{ об/мин}$	$\eta, \%$	область работы	$N_T, \text{ МВт}$	$n_1', \text{ об/мин}$	$Q_1', \text{ л/с}$	$n, \text{ об/мин}$	$\eta, \%$	область работы
106,7	170	91,5	436,5	150	90,8	A — рабочая	170,0	91,5	435,9	150	90,92	A — рабочая
	122		340		83,0	B1 — зона нестационарности	122	88,48	334,2	145,1	85,11	B — рабочая
	114		325		82,0	C1 — зона нестационарности	114	99,68	349,3	163,4	76,09	C — рабочая
	90		277,7		75,5	D — рабочая	90,0	91,5	278	150	75,47	D — рабочая
	225		565		92,8	E — рабочая	225	91,5	564,7	150	92,82	E — рабочая
92,4	137,1	91,5	436,5	139,6	90,8	A — рабочая	137,1	91,5	436	139,6	90,92	A — рабочая
	98,3		340		83,0	B1 — зона нестационарности	98,3	88,41	329,5	134,9	85,14	B — рабочая
	91,9		325		82,0	C1 — зона нестационарности	91,9	99,68	349,3	152,1	76,09	C — рабочая
	72,5		277,7		75,5	D — рабочая	72,5	91,5	277,8	139,6	75,45	D — рабочая
	182		565		92,8	E — рабочая	182	91,5	566	139,6	92,81	E — рабочая

высокими значениями КПД при всех рабочих значениях напоров.

В левой части рис. 3 приведена построенная в соответствии с выражением (1) зависимость  $H(n)$  при  $n_1' = n_{1\text{ опт}}' = 91,5$  об/мин. По этой зависимости для каждого рабочего значения напора  $H$  может быть определено натурное значение частоты вращения  $n$ .

На эксплуатационной характеристике рис. 3 для  $H = 106,7$  м нанесены точки А, В1, С1, D, Е, соответствующие одноименным режимам работы гидроагрегата на рис. 1 и рис. 2. На эксплуатационной характеристике рис. 3 также нанесены точки А, В1, С1, D, Е для  $H = 92,4$  м, соответствующие одноименным режимам работы гидроагрегата на универсальной характеристике (рис. 2). Упомянутые режимы работы гидроагрегата при  $H = 106,7$  м и  $H = 92,4$  м подобны и на универсальной характеристике (рис. 2) занимают одинаковое положение. При этом натурные значения частоты вращения гидроагрегата и параметров режима ( $N_r, Q$ ) различны. В таблице в графе “Заданный режим работы” приведены натурные значения мощностей и частот вращения гидроагрегата для напоров 106,7 и 92,4 м при оптимальном значении приведенной частоты вращения  $n_1' = n_{1\text{ опт}}' = 91,5$  об/мин.

Анализ режимов работы гидроагрегата с переменной частотой вращения рекомендуется проводить по универсальной характеристике.

При переменной частоте вращения частные эксплуатационные характеристики (при разных значениях  $n = \text{const}$ ) сложны в анализе и не дают полного представления о свойствах гидроагрегата. Свойства гидротурбины с точки зрения достижения оптимального значения КПД при переменной частоте вращения отражаются на эксплуатационной характеристике, построенной при условии  $n_1' = n_{1\text{ опт}}' = \text{const}$  (рис. 3). Однако и эта характеристика не позволяет в полной мере проанализировать все возможные режимы работы гидроагрегата с переменной частотой вращения. Например, как будет показано ниже, необходимые мероприятия по выводу гидроагрегата из зоны нестационарности потока при заданном оператором значении мощности становятся очевидными при анализе именно универсальной характеристики.

Для иллюстрации сказанного обратимся к рис. 2. В левой части рисунка в плоскости  $n_1'(H)$  приведены изолинии  $n = \text{const}$ , построенные в соответствии с выражением (1). Из рисунка видно, что для возможности работы рассматриваемого гидроагрегата с оптимальным значением приведенной частоты вращения  $n_{1\text{ опт}}' = 91,5$  об/мин (линия 1) необходимо регулировать частоту вращения гидроагрегата в диапазоне от  $n_{\text{ min}} = 137,8$  об/мин (при

$H_{\text{ min}} = 90$  м) до  $n_{\text{ max}} = 152,32$  об/мин (при  $H_{\text{ max}} = 110$  м). При этом для всех рабочих значений напоров геометрическим местом всех возможных режимов работы гидроагрегата является линия 1.

При работе с переменной частотой вращения и с оптимальным значением приведенной частоты вращения (т.е. с максимальным КПД) диапазон изменения частот вращения гидроагрегата составляет

$$\frac{n_{\text{ max}}}{n_{\text{ min}}} = 1,105 \quad (2)$$

и соответствует соотношению действующих напоров

$$\frac{H_{\text{ max}}}{H_{\text{ min}}} = \left( \frac{n_{\text{ max}}}{n_{\text{ min}}} \right)^2 = 1,22. \quad (3)$$

Заметим, что при постоянной частоте вращения гидроагрегата, например  $n = 150$  об/мин, изменение напора приводит к изменению значения приведенной частоты вращения и невозможности работы в оптимальном режиме. Как, например, для  $H = 92,4$  м на рис. 1.

**Алгоритм оптимального управления режимами работы гидроагрегата.** Предлагается следующий алгоритм управления режимом работы гидроагрегата:

если заданный режим работы гидроагрегата находится на универсальной характеристике (рис. 2) в рабочей области, то поддерживается оптимальное значение приведенной частоты вращения; в рассматриваемом случае геометрическим местом точек таких режимов является линия 1 (режимы А, D, Е);

если по команде оператора задается режим работы агрегата, попадающий в зону нестационарности потока (например, режимы С1 и В1 на рис. 2), то корректируется заданное значение приведенной частоты вращения и агрегат переводится в режим работы со скорректированным значением  $n_1'$  при сохранении заданного значения мощности гидротурбины (например, режимы В и С на рис. 2).

В таблице в графе “Оптимизированный режим работы” приведены натурные значения мощностей и частот вращения гидроагрегата для напоров 106,7 и 92,4 м после оптимизации заданных режимов.

Вывод гидроагрегата из зоны нестационарности потока осуществляется по линиям постоянной мощности. На универсальной характеристике линии постоянной мощности при неизменном значении напора отвечают условию

$$Q_1^1 \cdot h = \text{const}. \quad (4)$$

На рис. 2 линии постоянной мощности проведены через точки В1 и С1. Из рис. 2 видно, что для обеспечения возможности работы гидроагрегата с заданной мощностью, соответствующей точке С1, необходимо перевести его в режим, соответствующий точке С, со значением приведенной частоты вращения  $n_1'_{\max} = 99,5$  об/мин (с понижением КПД с 82 до 76 %). При этом по левой части рис. 2 (точки С) можно оценить необходимое значение частоты вращения гидроагрегата:  $n = 151,8$  об/мин при  $H = 92,4$  м и  $n = 163,1$  об/мин при  $H = 106,7$  м.

Для обеспечения возможности работы гидроагрегата с заданной мощностью, соответствующей точке В1, необходимо перевести его в режим работы, соответствующий точке В, со значением приведенной частоты вращения  $n_1'_{\min} = 88,5$  об/мин (с повышением КПД с 83 до 85 %). При этом по левой части рис. 2 (точки В) можно оценить необходимое значение частоты вращения гидроагрегата:  $n = 135$  об/мин при  $H = 92,4$  м и  $n = 145,1$  об/мин при  $H = 106,7$  м.

В рассматриваемом случае для вывода гидроагрегата из зоны нестационарности при сохранении заданного оператором значения мощности (точки В, С на рис. 2) при всех значениях действующего напора потребуются регулирование частоты вращения агрегата в диапазоне

$$\frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_1'_{\max} \sqrt{H_{\max}}}{n_1'_{\min} \sqrt{H_{\min}}} = 1,24. \quad (5)$$

В выражении (2) указан диапазон изменения частот вращения гидроагрегата, необходимый для обеспечения работы гидротурбины с оптимальным значением КПД при всех действующих значениях напоров. Из сопоставления (2) и (5) следует, что для рассматриваемого гидроагрегата нужно обеспечить регулирование частоты вращения в диапазоне, соответствующем выражению (5).

**Результаты моделирования режимов работы гидроагрегата.** На основе предложенного выше алгоритма оптимального управления режимами работы гидроагрегата разработана система совместного управления гидротурбиной и асинхронизированным гидрогенератором (АСГГ), которая проверена на компьютерной модели.

На рис. 4 приведена блок-схема модели для исследования режимов работы гидроагрегата с переменной частотой вращения. Модель разработана в программной среде “Matlab-Simulink”. В состав модели входят следующие блоки:

модель АСГГ;

модель гидротурбины — по статическим характеристикам в соответствии с универсальной характеристикой;

регулятор оптимизации режима работы гидроагрегата — реализация предложенного алгоритма управления режимами работы гидроагрегата;

регулятор частоты вращения АСГГ;

регулятор открытия направляющего аппарата гидротурбины — стандартная модель регулятора гидротурбины из библиотеки “Matlab”.

На рис. 4:  $P, P_{\text{зад}}$  — измеренное и заданное значения активной мощности АСГГ;  $H$  — текущее значение напора;  $n, n_{\text{зад}}$  — измеренное и заданное значения натурной частоты вращения агрегата;  $S, S_{\text{зад}}$  — измеренное и заданное значения открытия направляющего аппарата гидротурбины;  $M_T$  — момент турбины;  $M_e$  — электромагнитный момент АСГГ.

На рис. 5 в плоскости приведенных значений частоты вращения  $n_1'$  и расхода  $Q_1'$  показан годограф изменения режима работы гидроагрегата при последовательном изменении задания на мощность при постоянном напоре. Пунктирная линия соответствует заданной траектории (выходу регулятора), а сплошная линия показывает фактическое изменение параметров режима.

В исходном режиме агрегат работает в режиме А (рис. 2) с оптимальным значением приведенной частоты вращения  $n_1' = 91,5$  об/мин. Затем последовательно меняются заданные значения мощности — режимы В1, С1, D, E. При этом заданные режимы В1 и С1 расположены в зоне нестационарности потока и регулятор корректирует значение приведенной частоты вращения и переводит агрегат в режимы В и С соответственно при сохранении заданного значения мощности. В режимах D и E агрегат работает с оптимальным значением приведенной частоты вращения. При переходе агрегата из режима D в режим E гидротурбина “пересекает” зону нестационарности потока.

Регулятор оптимизации режима работы гидроагрегата (рис. 4) анализирует режимы работы гидроагрегата, основываясь на универсальной характеристике, поэтому представленный на рис. 5 годограф будет одинаковым при прочих равных условиях для всех рабочих значений напора.

В таблице приведены заданные и оптимизированные режимы работы гидроагрегата для напоров 92,4 и 106,7 м. На универсальной характеристике (рис. 2) приведенные параметры рассматриваемых режимов одинаковы, а натурные параметры режимов зависят от рабочего значения напора.

На рис. 6 приведена осциллограмма переходного процесса регулирования мощности гидроагрегата, соответствующая годографу рис. 5 при  $H = 106,7$  м. На рис. 6:  $N_T$  — натурная мощность турбины;  $n$  — натурная частота вращения гидроагрегата;  $t$  — время, в течение которого агрегат находится в нерабочей зоне (нестационарности потока);

пунктирной линией показаны заданные регулятором значения, а сплошной — фактическое изменение параметров режима.

Задание на изменение мощности осуществлялось в моменты времени  $t = 100; 200; 300; 400$  с. Качество переходного процесса при регулировании мощности агрегата определяется настройкой регуляторов (рис. 4).

В исследованиях, результаты которых приведены выше, во всех режимах, не попадавших в зону нестационарности, регулирование частоты вращения агрегата осуществлялось таким образом, чтобы приведенная частота вращения поддерживалась постоянной и равной оптимальному значению. В некоторых случаях по условиям работы гидроагрегата требуется иное регулирование приведенной частоты вращения, например для пропеллерных турбин в соответствии с некоторой линейной функцией от приведенного расхода. Предложенный алгоритм управления режимами работы гидроагрегата построен на основе анализа по универсальной характеристике гидромашины и позволяет осуществлять управление приведенной частотой вращения агрегата в произвольной функции от приведенного расхода.

## Выводы

1. В отличие от работы гидроагрегата с постоянной частотой вращения, при применении переменной частоты вращения приведенная частота вращения гидромашины не имеет однозначной связи со значением напора, поэтому анализ режимов работы гидротурбин с переменной частотой вращения рекомендуется проводить по универсальной характеристике. В статье приводится методика анализа ре-

жимов работы гидроагрегата с переменной частотой вращения.

2. На основе предложенной методики анализа разработан регулятор, оптимизирующий режим работы гидроагрегата с целью повышения эффективности работы гидротурбины, расширения мощностного диапазона работы за счет улучшения кавитационных условий работы и снижения гидродинамических воздействий на гидроагрегат.

Работа регулятора проверена на компьютерной модели, результаты исследований подтверждают теоретические положения.

4. Принципиальная возможность расширения регулировочного мощностного диапазона путем применения генераторов с переменной частотой вращения существует для всех типов реактивных турбин с жесткозакрепленными лопастями (радиально-осевые и пропеллерные гидромашины).

5. Указаны факторы, влияющие на эффективность расширения регулировочного диапазона.

## Список литературы

1. *Furuya S., Fujiki S., Hioki T., Yanagisawa T., Okazaki S., Kobayashi S.*, Development and achieved commercial operation experience of the world's first commissioned converter-fed variable-speed generator-motor for a pumped storage power plant. Japan. Cigre. 1992 Session 30 August — 5 September.
2. *Kuwabara T.* et al. Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawashi Power Station. — IEEE Trans. On Energy Conv., June 1996, Vol. 11, № 2.
3. *Абубакиров Ш. И.* Опыт и перспективы использования асинхронизированных гидрогенераторов в проектах ОАО “Институт Гидропроект” // Гидротехника. 2010. № 2.
4. *Кривченко Г. И.* Насосы и гидротурбины. — М.: Энергия, 1970.



## Гидромеханический расчет размеров спиральных камер с безмоментным сопряжением их оболочек со статором

Белаш И. Г., профессор (Национальный исследовательский университет “МЭИ”)

Предлагаются способы гидромеханических расчетов размеров спиральных камер с безмоментным сопряжением их оболочки с круглыми меридианными сечениями со статором.

**Ключевые слова:** спиральная камера, безмоментное сопряжение, момент скорости.

В практике проектирования спиральных турбинных камер используются, в частности, условия [1]: постоянства момента окружной составляющей абсолютной скорости потока  $V_u$  (закон площадей):

$$V_u \cdot r = K = \text{const}; \quad (1)$$

постоянства средних окружных скоростей  $V_{\text{иср}} = \text{const}$  во всех меридианных сечениях в пределах спирального канала камеры;

убывания средних скоростей  $V_{\text{иср}}$  по длине спирального канала камеры от входного меридианного сечения к зубу.

Если проектирование спиральной камеры увязано с профилированием колонн статора и с выбором формы профиля лопаток направляющего аппарата, то каждый из названных методов может обеспечить практически удовлетворительный результат. Следует отметить, что характер изменения окружной скорости потока  $V_u$  вдоль радиуса не зависит от метода расчета спиральной камеры: он остается гиперболическим.

При больших углах охвата спиральных камер  $\varphi_{\text{сп}}$  распределение окружных составляющих скоростей потока  $V_u$  по периметру статора и направляющего аппарата становится более равномерным, чем при малых  $\varphi_{\text{сп}}$ .

Отметим также, что в спиральных камерах, рассчитанных по условию постоянства или убывания средних скоростей  $V_{\text{иср}}$ , момент скорости в спиральном канале камеры обычно непрерывно уменьшается от входного сечения по направлению к зубу.

С учетом этого с позиций гидромеханики наиболее обоснованным является метод расчета спиральных камер, основанный на условии постоянства момента скорости  $V_u \cdot r = \text{const}$ . Принимая это условие в качестве основного, отметим некоторые отступления от реальности при расчете размеров спиральной камеры.

В инженерных расчетах спиральных камер момент скорости обычно принимается постоянным в пределах всего спирального канала, начиная от входного меридианного сечения (всего  $\varphi_{\text{сп}}$ ). В реальных условиях поток, поступающий в спиральную камеру с примерно равномерным спектром скоростей, в ее спиральном канале переформируется в поток с примерно постоянным моментом скорости в пределах некоторого сектора угла охвата  $\Delta\varphi_{\text{сп}}$ , который при  $\varphi_{\text{сп}} = 345 \dots 355^\circ$  достигает  $60 \dots 70^\circ$  [2].

При обеспечении условия постоянства момента скорости линии тока представляют логарифмическую траекторию (спираль) с постоянным углом  $\delta_{\text{сп}}$ . Применительно к спиральной камере ее уравнение можно представить в виде

$$r = r_b \cdot e^{\varphi \text{tg} \delta_{\text{сп}}}. \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{сп}} = \text{const}$  — угол траектории потока, формируемого спиральной камерой, который остается постоянным независимо от режима работы гидротурбины;  $\varphi$  — координатный угол в пределах угла охвата  $\varphi_{\text{сп}}$ .

Однако такой поток, поступаая из спирального канала камеры в статор, деформируется его колоннами и линия тока уже не совпадает с логарифмической кривой. При этом кинематика скоростей потока деформируется таким образом, что радиальная составляющая скорости  $V_r$  увеличивается относительно больше, чем окружная  $V_u$ . Вследствие этого угол потока, сформированный спиральной камерой на входе в статор  $\delta_{\text{сп}}$ , на выходе увеличивается на величину  $\Delta\delta_{\text{ст}}$ :

$$\delta_{ctb} = \delta_{сп} + \Delta\delta_{ст}. \quad (3)$$

Особенно заметно увеличение угла потока на выходе из статора (перед направляющим аппаратом) у классических статоров. Это в основном обусловлено различием высот входных элементов колонн статора  $b_{ста}$  и выходных  $b_{ctb}$ :  $b_{ста} > b_{ctb}$ .

Угол потока, формируемый спиральной камерой перед входом в статор  $D_a$ :

$$\operatorname{tg}\delta_{сп} = \frac{Vra}{Vua} = \frac{Q_{вх}r_a}{\varphi_{сп}b_{ста}r_ak} = \frac{Q_{вх}}{\varphi_{сп}b_{ста}k}, \quad (4)$$

где  $\varphi_{сп}$  — в радианах;  $Q_{вх} = \frac{Q_p\varphi_{сп}}{360}$  — расход во входном меридианном сечении спиральной камеры, м<sup>3</sup>/с;  $k$  — момент скорости, м<sup>2</sup>/с.

Так как соотношение  $Q_{вх}/k = \text{const}$ , то из (4) получается

$$\operatorname{tg}\delta_{сп}b_{ста} = \text{const}. \quad (5)$$

Предположив, что колонны в статоре отсутствуют, а изменяется только его высота между верхним и нижним кольцами, тогда, исходя из свойства логарифмической спирали, получаем на входе в направляющий аппарат

$$\operatorname{tg}\delta_{сп}b_{ста} = \operatorname{tg}\delta_{сп0}b_0. \quad (6)$$

Отсюда

$$\operatorname{tg}\delta_{сп0} = \operatorname{tg}\delta_{сп}b_{ста}/b_0. \quad (7)$$

Так как  $b_{ста} > b_0$ , то получается, что угол потока перед направляющим аппаратом  $\delta_{сп0} > \delta_{сп}$ . Увеличение угла потока перед направляющим аппаратом произошло только за счет изменения высоты статора. Например, при соотношении  $b_{ста} = 1,2b_0$  и  $\varphi_{сп} = 27^\circ$  угол перед направляющим аппаратом возрастает до  $\varphi_{сп0} = 31^\circ 44'$ .

У статора с безмоментным сопряжением высота колонн от входа до выхода не меняется. Тем не менее, линия тока в пределах статора будет отличаться от логарифмической кривой. На выходе из реального статора поток, в результате стеснения его колоннами, получит прирост угла  $\Delta\delta_{ст} > 2 \dots 3^\circ$ , что в 2 – 2,5 раза меньше, чем у классических статоров с переменной высотой и телесными колоннами, где такой прирост угла потока достигает  $\Delta\delta_{ст} \approx 5 \dots 7^\circ$ .

Все известные методы гидромеханических расчетов могут быть использованы для спиральных камер с различными схемами сопряжения их круглых оболочек со статорами. Однако аналитические выражения формул для расчета их размеров существенно различаются в зависимости от геометрической схемы сопряжения меридианных сечений со статором.

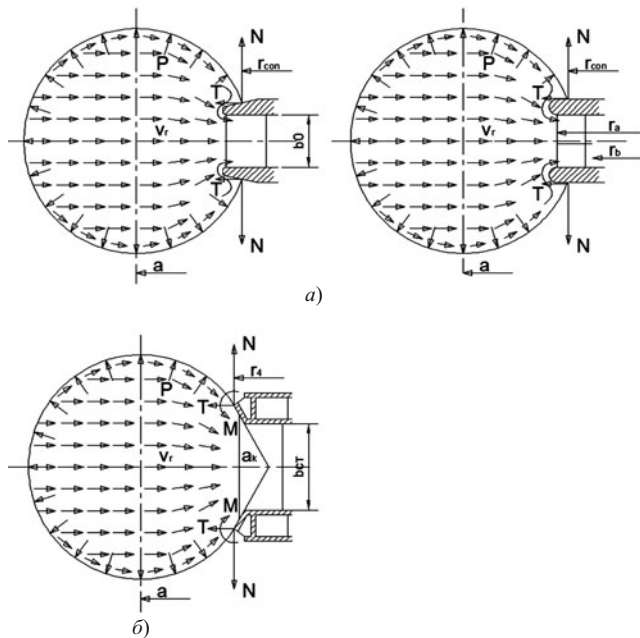
Элементы конструкции “безмоментной” спиральной камеры в технологическом отношении проще, чем у классических, что стимулирует их применение, несмотря на очевидные недостатки кинематики потока на входе в статор по сравнению с классическими камерами (рис. 1).

Принципиальные отличия “безмоментной” спиральной камеры от классической следующие:

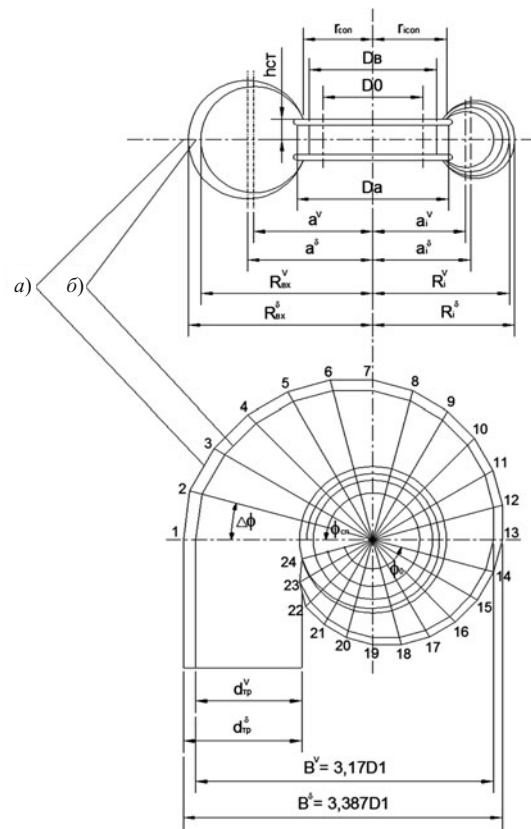
верхнее и нижнее кольца статора имеют плоскую форму в отличие от тороидальной у классических; спиральный канал камеры образуется только круглыми меридианными сечениями, исключая овальные;

сопряжение оболочки спирального канала камеры с плоскими кольцами статора осуществляется, на большей части сектора угла охвата  $\varphi_{сп}$  посередине торцовых профилей колонн статора (рис. 2)

$$r_{соп} = r_a + \frac{r_b}{2}, \quad (8)$$



**Рис. 1.** Схемы геометрического сопряжения меридианных сечений со статором и кинематика радиальных скоростей в спиральных камерах: *a* — безмоментная схема; *b* — классическая схема



**Рис. 2.** Совмещенные проекции спиральных камер с безмоментной схемой сопряжения, рассчитанные:

*a* — по средней скорости потока во входном меридианном сечении  $V_{вх}(H_p) = 10,83$  м/с;

*b* — по заданному углу потока  $\delta_{сп0} = 32^\circ$

а не на периферии, как у классических статоров. Такая геометрическая схема сопряжения оболочки спиральной камеры с плоскими кольцами статора позволяет обеспечить передачу большей части сил внутреннего давления воды в спиральном канале камеры на колонны статора, в основном на их растяжение, и значительно уменьшить изгибающий момент в колоннах преимущественно за счет минимизации плеча действия сил.

Расчет размеров спиральной камеры может быть выполнен исходя из одного из двух возможных условий:

из величины средней скорости потока во входном меридианном сечении  $V_{вх}(H_p)$ ;

из величины угла требуемого направления потока перед направляющим аппаратом  $\delta_{сп0}$  в режимах наиболее продолжительной работы гидротурбины.

На основании принятого допущения момент скорости потока, формируемого спиральной камерой, определяется по параметрам входного меридианного сечения, м<sup>2</sup>/с:

$$K = \frac{Q_{ax} \cdot \varphi_{cn}^0}{360^\circ \cdot \int_{a_{ax}-\rho_{ax}}^{a_{ax}+\rho_{ax}} b(r) \frac{dr}{r}} = \frac{Q_{ax}}{J_{ax}} \quad (9)$$

Используя соотношения (6) и (7) для безмоментного сопряжения со статором с постоянной высотой его колонн, для которого можно принять  $b_{ста} \approx b_0$ , получаем

$$\operatorname{tg} \delta_{сп0} = \frac{Q_{вх}}{K \cdot b_0 \cdot \varphi_{сп}} = \frac{\int_{a_{вх}-\rho_{вх}}^{a_{вх}+\rho_{вх}} b(r) \frac{dr}{r}}{b_0 \cdot \varphi_{сп}} = \frac{2\pi \cdot \left( a_{вх} - \sqrt{a_{вх}^2 - \rho_{вх}^2} \right)}{b_0 \cdot \varphi_{сп}} = \frac{J_{вх}}{b_0 \cdot \varphi_{сп}} \quad (10)$$

Гидромеханический расчет спиральной камеры с безмоментным сопряжением ее оболочки со статором исходя из заданной величины средней скорости потока во входном меридианном сечении  $V_{вх}(H_p) = 10,83$  м/с при условии постоянства момента скорости  $V_{вх}r = \text{const} = K$ . Постоянные величины:  $\delta_{сп0} = 27^\circ 20'$  (12);  $K = V_{вх}r = 69,68587$  м<sup>2</sup>/с (9);  $S = \frac{Q_{рас}}{2\pi K \cdot 360} = 0,001516$  (18);  $A = \frac{r_a + r_b}{2} = 4,1825$  м;  $B = \frac{r_a - r_b}{2} = 0,3175$  м

Номер сечения		1	14	15	22	
$\Sigma \delta \varphi_i^0$ , град		0	0	15	120	
$\varphi_i^0$ , град.		I	345	150	30	
Радиусы круглых меридианных сечений $\rho_i$ , м (17), (19)	$S\varphi_i$	II	0,52528	0,228382	0,205544	0,04567
	$r_{соп} = A + B \frac{\Sigma \Delta \varphi_i}{\varphi_0}$	III	4,1825	4,1825	4,21425	4,4365
	$2[\text{III}] [\text{II}]$	IV	4,39357	1,910422	1,73387	0,40528
	$[\text{IV}] - h_{ст}^2$	V	3,95853	1,47482	1,29827	0,03031
	$\sqrt{[\text{V}]}$	VI	1,989565	1,21442	1,139419	0,17410
	$[\text{VI}] + [\text{III}]$	VII	2,51484	1,44280	1,34496	0,21977
	$[\text{VII}]^2$	VIII	6,32445	2,08168	1,808928	0,0483
	$[\text{VIII}] - h_{ст}^2$	IX	6,7600	2,51728	2,2445	0,48390
	$\rho_i = \sqrt{[\text{IX}]}$	X	2,600	1,58659	1,498	0,6956
Площади меридианных сечений $F_i = \pi \rho_i^2 = \pi [\text{X}]^2$ , м <sup>2</sup>		XI	21,3716	7,90823	7,0497	1,5202
Расстояния $a_i$ , м (14)	$[\text{X}]^2 - h_{ст}^2$	XII	6,3244	2,081667	1,80892	0,048303
	$\sqrt{[\text{XII}]}$	XIII	2,511486	1,442798	1,3449	0,219779
	$a_i = [\text{XIII}] + [\text{III}]$	XIV	6,69734	5,62529	5,5627	4,6562
$R_i = [\text{XIV}] + [\text{X}]$ , м		XV	9,29734	7,81188	7,0607	5,3519
Интеграл $J_i$ , м (10)	$[\text{XIV}]^2 - [\text{X}]^2$	XVI	38,09436	29,12661	28,699	21,1970
	$[\text{XIV}] - \sqrt{[\text{XVI}]}$	XVII	0,52576	0,22838	0,50549	0,05225
	$J_i = 2\pi [\text{XVII}]$	XVIII	3,30047	1,43496	1,29117	0,32833
Расход $Q_i = K [\text{XVIII}]$ , м <sup>3</sup> /с		XIX	230,0	100,0	90,0	22,85
$V_{сп} = [\text{XIX}]/[\text{XI}]$ , м/с		XX	10,83	12,64	12,76	15,03

Это соотношение справедливо и для промежуточных сечений, соответствующих координатным углам  $\varphi_i$ :

$$J_i = \text{tg} \varphi_{сп0} b_0 \varphi_i. \quad (11)$$

Угол потока, формируемого спиральной камерой, отнесенного к высоте направляющего аппарата, определяется по параметрам входного меридианного сечения (10)

$$\delta_{сп0} = \text{arctg} \left( \frac{Q_{вх}}{K \cdot b_0 \cdot \varphi_{сп}} \right). \quad (12)$$



Гидромеханический расчет спиральной камеры с безмоментным сопряжением ее оболочки со статором исходя из заданной величины угла потока, формируемого спиральной камерой  $\delta_{\text{сп}0} = 32^\circ$  при условии постоянства момента скорости  $V_{\mu}r = \text{const. } K = V_{\mu}r = 57,668185 \text{ м}^2/\text{с}$ ;

$$M = \frac{h_0 \text{tg} \delta_{\text{сп}0}}{360} = 0,00183989 \text{ м}; C = h_0 \text{tg} \delta_{\text{сп}0} = 0,6623615 \text{ м}$$

Номер сечения		1	14	15	22	
$\Sigma \delta \varphi_i^0$ , град		0	0	15	120	
$\varphi_i^0$ , град		I	345	150	30	
Радиусы круглых меридианных сечений $\rho_i$ , м (20)	$M\varphi_i$ , м	II	0,634763	0,27598	0,24838	0,05519
	$r_{\text{соп}} = A + B \frac{\Sigma \Delta \varphi_i}{\varphi_0}$	III	4,1825	4,1825	4,21425	4,4365
	$2[\text{III}] + [\text{II}]$	IV	8,99976	8,64098	8,67688	8,92819
	$2[\text{III}] [\text{III}]$	V	5,236794	2,30859	2,09351	0,48975
	$[\text{V}] - h_{\text{ст}}^2$	VI	4,80119	1,87299	1,65791	0,054154
	$2\sqrt{[\text{VI}]}$	VII	4,38232	2,73715	2,57519	0,46542
	$[\text{VII}] + [\text{IV}]$	VIII	13,38208	11,3781	11,2520	9,3936
	$[\text{VII}] [\text{III}]$	IX	8,49445	3,14017	2,79484	0,51848
	$\rho_i = \sqrt{[\text{IX}]}$	X	2,9145	1,77205	1,67178	0,7200
Площади меридианных сечений $F_i = \pi[X]^2$ , м <sup>2</sup>		XI	26,68	9,8651	8,78027	1,6288
Расстояния $a_i$ , м (14)	$[X]^2 - h_{\text{ст}}^2$	XII	8,05871	2,70456	2,3592	0,08288
	$\sqrt{[\text{XII}]}$	XIII	2,83878	1,64455	1,5359	0,28789
	$a_i = [\text{XIII}] + [\text{III}]$	XIV	7,02128	5,8270	5,7502	4,7243
$R_i = [\text{XIV}] + [X]$ , м		XV	9,93578	7,599	7,4220	5,444
$J_i = C\varphi_i$ (11), рад		XVI	3,98833	1,73405	1,56065	0,3469
$Q_i = KJ_i$ , м <sup>3</sup> /с		XVII	230,0	100,0	90,0	20,0
$V_{\text{сп}} = [\text{XVII}]/[\text{XI}]$ , м/с		XVIII	8,618	10,136	10,250	12,283

Преобразовав выражение (10) применительно к произвольному меридианному сечению, получаем общее выражение для определения радиусов круглых меридианных сечений, соответствующих координатным углам  $\varphi_i$ :

$$\rho_i = \sqrt{2a_i \frac{\varphi_i \cdot b_0 \cdot \text{tg} \delta_{\text{сп}0}}{2\pi} - \left( \frac{\varphi_i \cdot b_0 \cdot \text{tg} \delta_{\text{сп}0}}{2\pi} \right)^2}, \quad (13)$$

где угол  $\varphi_i$  в радианах, но можно и в градусах, приняв  $2\pi = 360^\circ$ .

Для безмоментной схемы сопряжения оболочки спиральной камеры со статором (рис. 2)

$$a_i = r_{\text{con}} + \sqrt{\rho_i^2 - h_{\text{ст}}^2}. \quad (14)$$

Формулу (13) можно использовать для любой схемы геометрического сопряжения оболочки со статором, подставив в нее соответствующее выражение для  $a_i$ .

Радиус сопряжения  $r_{\text{соп}}$ , начиная от входного меридианного сечения, желательнее выдерживать постоянным (8) в возможно большем секторе угла охвата ( $\varphi_{\text{сп}} - \varphi_0$ ) (рис. 2). Однако при  $\varphi_i < \varphi_0$  радиусы меридианных сечений  $\rho_i$  уменьшаются до таких размеров, при которых для благоприятного сопряжения этих сечений с плоским кольцом статора требуется перемещение точки сопряжения на периферию колец до  $r_{\text{иссо}} \leq r_a = D_a/2$ . Для вычисления размеров радиусов  $r_{\text{иссо}}$  желательнее принять закономерную зависимость величины этих радиусов от координатных углов  $\varphi_i$  [4].

Если обозначить минимальный координатный угол, до которого удается сохранять постоянным радиус сопряжения (8), равный  $\varphi_0$ , то закономерность увеличения радиусов сопряжения в секторе угла  $\varphi_0$  можно представить в виде

$$r_{\text{иссо}}(\varphi_i) = \frac{r_a + r_b}{2} + \left( \frac{r_a - r_b}{2} \right) \cdot \frac{\sum_0^{\varphi_0} \Delta\varphi}{\varphi_0} = A + B \cdot \frac{\sum_0^{\varphi_0} \Delta\varphi}{\varphi_0}, \quad (15)$$

где  $\Delta\varphi$  — шаг дискретных значений изменения координатных углов  $\varphi_i$ , обычно кратный принятому значению угла охвата  $\varphi_{\text{сп}}$  — в расчетах принимается равным, например, 15 или 18° [3].

Для крайних значений  $\sum_0^{\varphi_0} \Delta\varphi$  при  $\sum_0^{\varphi_0} \Delta\varphi = 0$ , т.е. когда  $\Delta\varphi_i = 0$  —  $r_{\text{иссо}} = \frac{r_a + r_b}{2}$ , а при  $\sum_0^{\varphi_0} \Delta\varphi = \varphi_0$  это меридианные сечения вблизи зуба спиральной камеры —  $r_{\text{иссо}} = r_a$ . Переменная величина радиуса сопряжения находится в пределах

$$\frac{r_a + r_b}{2} \leq r_{\text{иссо}}(\varphi_i) \leq r_a. \quad (16)$$

При расчете размеров спиральной камеры, исходя из заданной величины средней скорости потока во входном меридианном сечении  $V_{\text{вх}}(H_p)$  радиусы круглых меридианных сечений удобно вычислять по формуле (17), полученной на основе выражений (10) и (14):

$$\rho_i = \sqrt{h_{\text{ст}}^2 + \left[ \frac{Q_{\text{рас}}}{2\pi K} \cdot \frac{\varphi_i^o}{360^o} + \sqrt{2r_{\text{con}} \cdot \frac{Q_{\text{рас}}}{2\pi K} \cdot \frac{\varphi_i^o}{360^o} - h_{\text{ст}}^2} \right]^2}. \quad (17)$$

Это выражение можно представить более компактно, введя обозначение

$$S = \frac{Q_{\text{рас}}}{2\pi K \cdot 360^o}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (17), получаем

$$\rho_i = \sqrt{h_{\text{ст}}^2 + \left[ S \cdot \varphi_i^o + \sqrt{2r_{\text{con}} \cdot S \cdot \varphi_i^o - h_{\text{ст}}^2} \right]^2}. \quad (19)$$

При расчете размеров спиральной камеры, исходя из заданного угла натекания потока  $\delta_{\text{сп}0}$ , радиусы круглых меридианных сечений удобно определять по формуле (20), полученной на основе выражений (13) и (14):

$$\rho_i = \sqrt{\frac{\varphi_i \cdot b_0 \cdot \text{tg}\delta_{\text{сп}0}}{360^o} \cdot \left( 2r_{\text{con}} + \frac{\varphi_i \cdot b_0 \cdot \text{tg}\delta_{\text{сп}0}}{360^o} + 2\sqrt{2r_{\text{con}} \cdot \frac{\varphi_i \cdot b_0 \cdot \text{tg}\delta_{\text{сп}0}}{360^o} - h_{\text{ст}}^2} \right)}. \quad (20)$$

Воспользовавшись подстановкой (11), это выражение можно представить в виде

$$\rho_i = \sqrt{\frac{J_i}{2\pi} \cdot \left[ 2r_{con} \cdot \frac{J_i}{2\pi} + 2\sqrt{2r_{con} \cdot \frac{J_i}{2\pi} - h_{ст}^2} \right]^2} \quad (21)$$

Формулы (17) и (20) для вычисления радиусов круглых меридианных сечений дают одинаковый результат при взаимосвязанных параметрах:  $Q_{рас}$ ,  $\varphi_{сп}$ ,  $K$ ,  $V_{вх}(H_p)$ ,  $\delta_{сп0}$ .

Радиусы наружного контура спиральной камеры в плане определяются по результатам расчета размеров  $a_i$  (14) и  $\rho_i$  (17) – (21):

$$R_i = a_i + \rho_i \quad (22)$$

Площади соответствующих меридианных сечений можно вычислять как площади круглых сечений без учета небольших добавочных площадей статора, ограниченных окружностями соответствующих меридианных сечений с одной стороны и выходными кромками колонн статора (диаметр  $D_b$ ) — с другой, а также высотой статора  $b_{ст}$ :

$$F_i = \pi \rho_i^2 \quad (23)$$

Такой способ определения площадей обоснован методом определения размеров радиусов круглых меридианных сечений спиральной камеры  $\rho_i$ , который исходит из того, что весь расход в данном сечении протекает через его круглую часть.

В качестве примеров в табл. 1 и 2 сокращенно приведены схемы алгоритмов рассмотренных гидротехнических расчетов размеров спиральных камер с безмоментным сопряжением их оболочек со статором:

исходя из принятой величины средней скорости потока во входном меридианном сечении  $V_{вх}(H_p)$  (табл. 1);

исходя из обеспечения требуемого направления потока перед направляющим аппаратом  $\delta_{сп0}$  (табл. 2).

Расчет выполнен для одинаковых исходных данных:  $H_{рас} = 140$  м;  $H_{max} = 183$  м;  $N = 307$  МВт;  $D_1 = 5,3$  м;  $D_0 = 1,25D_1 = 6,625$  м;  $b_0 = 0,2D_1 = 1,06$  м;  $D_a = 9,0$  м;  $D_b = 7,73$  м; профиль лопаток направляющего аппарата — ассиметричный положительной кривизны.

Угловое положение входных элементов лопаток направляющего аппарата указанного профиля в оптимальном режиме  $\alpha_{н0} \approx 29 \dots 30^\circ$ .

С учетом доворота потока после прохождения им статора на величину  $\Delta\alpha_{ст} \approx 2 \dots 3^\circ$ , спиральная камера, рассчитанная исходя из рекомендуемой многолетней практикой средней скорости во входном сечении  $V_{вх}(H_p) = 10,83$  м/с, обеспечивает благоприятные условия работы гидротурбины, формируя поток с углом  $\delta_{сп0} = 27^\circ 20'$ , для соответствующего оптимальному режиму работы гидротурбины.

Для крупных гидротурбин с принятыми в примере параметрами нередко рекомендуется наиболее продолжительная работа в режимах, близких к максимальным нагрузкам. Этим режимам соответствуют открытия направляющего аппарата с угловым положением входных элементов лопаток  $\alpha_{нmax} \approx 35 \dots 36^\circ$ . В этих режимах для благоприятного натекания потока в направляющий аппарат спиральная камера должна формировать поток с углом  $\delta_{сп0} = \alpha_{нmax} - \Delta\delta_{ст} = 32^\circ$ . Для такого режима выполнен гидромеханический расчет размеров спиральной камеры, результаты которого сокращенно приведены в табл. 2.

По результатам расчетов построены план и некоторые меридианные сечения спиральных камер (рис. 2), где показаны основные геометрические параметры, используемые в расчетах.

Увеличение угла потока, который должна формировать спиральная камера по сравнению с оптимальным режимом работы гидротурбины от  $\delta_{сп0} = 27^\circ 20'$ , до угла  $\delta_{сп0} = 32^\circ$  — в режиме близком к максимальной мощности, потребовало увеличения размеров спиральной камеры. Ширина спиральной камеры, рассчитанной по  $V_{вх} = 10,83$  м/с ( $\delta_{сп0} = 27^\circ 20'$ ), составил  $B_V = 16,8$  м =  $3,17D_1$ , а при требуемом значении  $\delta_{сп0} = 32^\circ$  —  $B_V = 17,95$  м =  $3,387D_1$ .

Изложенный метод гидромеханического расчета размеров спиральных камер с безмоментным сопряжением их оболочки со статором обеспечивает достаточно высокую точность расчета размеров проточной части камер и удобен для использования в инженерной практике.

## Выводы

1. Предлагаются формулы и соответствующие им два алгоритма гидромеханических расчетов размеров спиральных камер с безмоментным сопряжением их оболочек со статором в зависимости от принятых условий:

исходя из принятой величины средней скорости потока во входном меридианном сечении  $V_{вх}(H_p)$ ;

исходя из требования, чтобы проектируемая спиральная камера формировала поток на входе в направляющий аппарат с углом натекания  $\delta_{сп0}(a_0)$ , соответствующим режиму наиболее продолжительной работы гидротурбины.

2. Исходя из необходимости обеспечения плавности очертаний наружного контура спиральной камеры в плане  $[R_i(\varphi_i)]$ , предлагается (по мере приближения к зубу, в секторе угла охвата  $\varphi_0$ ) формула закономерности изменения радиусов  $r_{исп}(\varphi_i)$  сопряжения круглых меридианных сечений спирального канала со статором.

## Список литературы

1. *Справочник по гидротурбинам* / Под ред. Н. Н. Ковалева. — Л.: Машиностроение, 1984.
2. *Михайлов И. Е.* Турбинные камеры гидроэлектростанций. — М.: Энергия, 1970.
3. *Камеры.* Спиральные металлические гидравлических вертикальных турбин: ОСТ 108.023.11–80. — Л.: НПО ЦКТИ, 1984.
4. *Белаи И. Г.* Спиральные камеры гидротурбин. — М.: МЭИ, 2011.



## Моделирование зон вихревых течений в обводных галереях шлюзовых камер

Васин А. В., кандидат физ.-мат. наук, доцент, Тимофеева О. А., аспирант (Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций)

В рамках модели Лаврентьева и Шабата об отрывных течениях численно моделируется зона завихренности при вихревом течении жидкости в круговой камере с выступом. Работа необходима как эталонный образец для моделирования вихревых течений в обводных галереях шлюзовых камер.

**Ключевые слова:** вихревое течение жидкости, течения с постоянной завихренностью, гармонические функции, задача Дирихле.

В настоящей работе исследуется и моделируется течение жидкости в водопроводных галереях шлюзовых камер. Водопроводные галереи являются одним из важнейших конструктивных элементов судоходного шлюза. При их проектировании специалисты сталкиваются со следующими проблемами. Скорость жидкости на вогнутой стенке (в плане) обводной галереи больше, чем на выпуклой стенке, вплоть до того, что на выходе из обводной галереи образуется кинжальная струя. В опыте Н. Б. Городенского была получена следующая картина течения в области ABCD (рис. 1). Расход жидкости через водопроводные галереи во время наполнения достигает значительных величин. При столь значительных массах жидкости, перемещающихся с большими скоростями, против выходных отверстий галерей в нижней голове неизбежно возникают волнения и вихри. Кроме того, неравномерно распределяющиеся скорости воды размывают бетонные конструкции головной части канала. Для достижения желательного распределения скоростей в выходных отверстиях Н. Б. Городенский [1, 2] предложил применить гасители скоростей в виде выступов, расположенных на вогнутой стороне вертикальной стенки галереи. Если отверстие галереи разветвляется на несколько каналов, то вышеуказанные отверстия следует располагать на вогнутых сторонах каждого из каналов.

При изучении предлагаемых гасителей были произведены лабораторные исследования скоростей потока галерей как с гасителями, так и без них. Опыты показали, что применение гасителей

дает достаточно равномерное распределение скоростей, причем абсолютные величины наибольших скоростей падают примерно в 2 раза. К сожалению, математического обоснования опыта Н. Б. Городенского не предложено (хотя опыт реализован в конструкции шлюза Нижнесвирского гидроузла). Цель настоящей работы устранить этот пробел — смоделировать распределение скоростей предложенного опыта. Не менее важной задачей является возможность применения для расчетов методов теории движения идеальной жидкости без учета вязкости.

Перечислим те условия, которые приводят к содержательным приложениям, не только качественным, но и количественным. Будем рассматривать плоское установившееся движение идеальной жидкости. В этом случае уравнения движения Эйлера приобретают простой вид, пригодный для дальнейшего исследования. Вопрос ставится так: можно ли, оставаясь в рамках идеальной жидкости, получить теоретические результаты, согласованные с практическими наблюдениями. Рассмотрим более простую модель водопроводной галереи, имеющую вид полукольца  $D$  (рис. 2). Конечно, данная область отличается от формы камеры, представленной в опыте Н. Б. Городенского, но нам важно, чтобы камера содержала вогнутые и выпуклые стенки. В данном случае полукольцо является простейшим эталонным образцом для моделирования. В рамках потенциального течения для поля скоростей строится комплексный потенциал

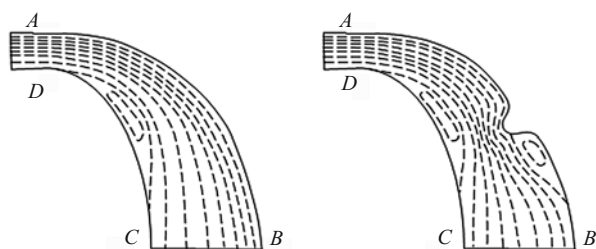


Рис. 1. Полученная в опыте картина течения в камере без выступа и с выступом

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y),$$

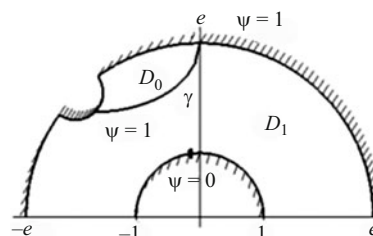


Рис. 2. Модель обводной галереи с выступом в плане

где  $\varphi(x, y)$  и  $\psi(x, y)$  — сопряженные гармонические в  $D$  функции, называемые потенциалом скоростей и функцией тока соответственно.

Абсолютная величина скорости жидкости уменьшается от внутренней дуги полукольца к внешней, а это находится в противоречии с практическими измерениями. Ситуация не изменится для других форм поворотов водопроводных галерей: на выпуклых поверхностях скорость на практике меньше, а схема идеального потока для потенциального течения дает обратный результат. На самом деле возникает осторожная гипотеза, что при движении в поворотных галереях и вообще в каналах непрямолинейной формы схема потенциального течения идеальной жидкости не работает. Мы вынуждены для более точного описания движения использовать модели с завихренностью, например в самой простой форме с постоянной завихренностью [3], где применение подобных моделей дает хорошие результаты для выделения вихревых областей и для склеивания вихревых и потенциальных течений. В нашем случае важным является построение модели при движении по галерее из рис. 2 так, чтобы скорость на внешней границе была больше, чем на внутренней.

Таким образом, мы вынуждены применить новую схему установившегося движения, если откажемся от условия отсутствия вихрей, предполагая, что вихри располагаются во всех точках области. Эта модель в случае реальных водопроводных галерей как раз дает вихревое течение с меньшими скоростями на выпуклых поверхностях, что согласуется с опытной кинематической картиной. Для водопроводной галереи формы из рис. 2 можно, варьируя величину расхода и величину завихренности, также получить требуемое распределение скоростей, отличное от потенциальных моделей, когда абсолютные величины скоростей увеличиваются от внутренней границы к внешней. Этот вывод нужно тщательно исследовать, так как без учета вязкости мы получаем согласованные результаты с практическими измерениями.

Теперь становится понятным назначение выступа для отклонения потока. Если бы мы оставались в рамках потенциального течения, то вариационные принципы для гармонических функций дали бы уменьшение скоростей на внешней стенке при наличии выступа. Но для потенциального течения скорости и так меньше на внешней стенке, и назначение выступа непонятно. Если же учитывать движение с завихренностью, то теперь скорости на внешней стенке больше, чем на внутренней, и, по крайней мере, требуется их уменьшение. Правда, в данном случае функция тока не является гармонической, а лишь субгармонической и требуются иные вариационные принципы.

**Моделирование по схеме Лаврентьева — Шабата.** Наша цель состоит в том, чтобы уравнивать скорости на выходе из галереи, а также на оси галереи. Предполагаем, что течение жидкости в галерее без выступа завихренное с постоянной завихренностью. Малый выступ приводит к искривлению границы камеры и поэтому течение в галерее распадается на два независимых движения: 1) в области  $D_1$  за выступом, ограниченной стенками камеры, линиями входа и выхода потока и струей  $\gamma$ , срывающейся с нижнего края выступа; 2) в области  $D_0$ , дополняющей  $D_1$  до всей камеры.

Течение в  $D_1$  предполагается вихревым с постоянной завихренностью  $-\omega_1$ ,  $\omega_1 > 0$ , а в  $D_0$  — вихревым с постоянной завихренностью  $-\omega_0$ ,  $\omega_0 > 0$ . Кривая  $\gamma$  не задается, ее надо подобрать так, чтобы она была линией тока и поле скоростей всюду в камере оставалось непрерывным. В этом случае движение жидкости непотенциально, тем не менее, для решения задач обтекания, как и в классическом случае, вводится функция тока, для которой получаем уравнение Пуассона с разрывной правой частью

$$\Delta\psi = \begin{cases} -\omega_0, & z \in D_0 \\ \omega_1, & z \in D_1 \end{cases} \quad (1)$$

с заданными граничными условиями на стенках, а также на входе и выходе из камеры. А именно  $\psi(x, y) = 0$  на выпуклой стенке и  $\psi(x, y) = 1$  на вогнутой стенке (равна расходу жидкости), на входе галереи функция тока непрерывно изменяется от 0 до 1 по квадратичному закону (с целью обеспечить увеличение скорости от выпуклой стенки к вогнутой). На выходе из галереи мы знаем лишь, что линии тока ортогональны линии. Кроме того, имеем дополнительные условия:  $\psi|_\gamma = 1$ , так как кривая  $\gamma$  является линией тока. Таким образом, получаем обобщение известной задачи М. А. Гольдштика [3, 4]

$$\Delta\psi = \begin{cases} -\omega_0, & \psi(z) > 1 \\ \omega_1, & \psi(z) < 1 \end{cases} \quad (2)$$

с граничными условиями  $\psi|_\Gamma = \psi_0$ ,  $0 \leq \psi_0 \leq 1$ . Требуется решить нелинейное уравнение Пуассона, но у М. А. Гольдштика на части области функция тока все-таки гармонична, что существенно упрощает вычисления. В нашем случае функция тока на части области субгармонична, а в остальной части супергармонична. Алгоритм решения такого уравнения Пуассона известен для стандартных областей, где, в частности, имеются явные выражения для

оператора Грина через функцию Грина — в полуплоскости, моделирующие течения бесконечно глубокого бассейна с плоским дном. В работах И. И. Вайнштейна [5], Д. Ю. Потапова [6] доказано, что задача М. А. Гольдштика имеет нетривиальное решение (с непустой областью завихренности) при достаточно больших величинах завихренности —  $\omega > 4\epsilon/R^2$ , где  $R$  — радиус наибольшего круга, который можно вписать в область камеры. Кратко скажем, что метод доказательства, который работает и в нашей ситуации, заключается в исправлении границы раздела и состоит в следующем. Определим функцию

$$\psi_1 = \psi_0 - \frac{\omega}{2\pi} \int_{D_0} G(, z) dA(z),$$

где  $G$  — функция Грина задачи Дирихле для области  $D$ , а интегрирование совершается по площади.

В области  $D_0$  функция  $\psi_1$  удовлетворяет уравнению Пуассона, а в области  $D_1$  гармонична. Кроме того, функция  $\psi_1$  непрерывно дифференцируема, удовлетворяет граничным условиям. На линии раздела областей  $D_0$  и  $D_1$  функция тока должна быть равна 1. Найдем ту линию уровня функции  $\psi_1$ , где она обращается в ноль. Эта линия уровня ограничивает некоторую область  $D_1$ . Далее итеративно определим последовательность функций

$$\psi_{n+1} = \psi_n - \frac{\omega}{2\pi} \int_{D_n} G(, z) dA(z).$$

Следуя схеме [4, 5, 6] нетрудно доказать, что последовательность функций  $\psi_n$  сходится к непрерывно дифференцируемой функции  $\psi$ , а последовательность областей  $D_n$  сходится к области  $D$ , для которых выполняются условия задачи М. А. Гольдштика.

**Алгоритм решения.** Для областей общего вида нет возможности определить функцию Грина в явном виде. При использовании схемы склеивания течений с различными завихренностями в реальных водопроводных галереях мы вынуждены конструктивно строить оператор Грина, а по сути, численно решать граничные интегральные уравнения. Поэтому рассмотрим объемный потенциал (в нашем случае потенциал площади)

$$\psi_1 = \frac{1}{2\pi} \iint_{D_0} \ln \frac{1}{|\zeta - z|} dA(\zeta),$$

тогда гладкая функция  $\psi_1$  является решением уравнения Пуассона всюду в камере (в объединении областей  $D_1 \cup D_0$ ). Для неё выполняется

$$\Delta\psi_1 = \begin{cases} 0, & z \in D_1 \\ -1, & z \in D_0 \end{cases}$$

Естественно, нет соблюдения граничных условий. Чтобы удовлетворить граничным условиям, надо решить три задачи Дирихле:

1)  $\Delta\psi_2 = 0$  в области  $D = D_0 \cup D_1$  с граничными условиями  $\psi_2|_{\Gamma} = -\psi_1|_{\Gamma}$  (напоминаем, что это граничные условия общего вида, на части границы заданы значения функции, а на остальной части — значения ее нормальной производной);

2)  $\Delta\psi_3 = 0$  в области  $D = D_0 \cup D_1$  с граничными условиями  $\psi_3|_{\Gamma} = (-\psi_1 - (x^2 + y^2)/4)|_{\Gamma}$ ;

3)  $\Delta\psi = 0$  в области  $D = D_0 \cup D_1$  с граничными условиями  $\psi|_{\Gamma} = \psi$ .

В таком случае функция  $\psi = \omega_0(\psi_1 + \psi_2) + \omega_1(\psi_1 + \psi_3 + (x^2 + y^2)/4) + \psi$  является решением исходного уравнения Пуассона (4) с заданными граничными условиями. Решение каждой из упомянутых задач Дирихле производится методом граничных интегральных уравнений. Как известно, при предельном переходе при  $z \rightarrow \Gamma$  для значений гармонической функции на границе имеем следующее представление:

$$\psi_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\partial}{\partial \eta} \psi_0 \ln \frac{1}{|\zeta - z|} |d\zeta| - \frac{1}{2\pi} \left( -\pi\psi_0(z) + \int \psi_0 \frac{\partial}{\partial \eta} \ln \frac{1}{|\zeta - z|} |d\zeta| \right), \quad (4)$$

для гладких частей границы  $z, \zeta \in \Gamma$ . Понятно, что испытываемый скачок имеет другой вид в угловых точках границы, а у нас такие точки есть. Тем не менее, будем применять эту формулу, но следить за тем, чтобы узловые точки при численной реализации не совпадали с угловыми точками области. В правой части последней формулы стоит сингулярный интеграл, а в левой — слабо сингулярный интеграл с логарифмической особенностью. При вычислении сингулярных интегралов для составления системы линейных уравнений разобьем границу на участки  $[\zeta_j, \zeta_{j+1}]$ . В таком случае точками, в которых заданы значения гармонической функции или ее нормальной производной, будут точки  $z_j$  — середины отрезков  $[\zeta_j, \zeta_{j+1}]$ .

На линии  $\gamma$  раздела вихревых течений с различными завихренностями построенная функция тока  $\psi = \omega_0(\psi_1 + \psi_2) + \omega_1(\psi_1 + \psi_3 + (x^2 + y^2)/4) + \psi$

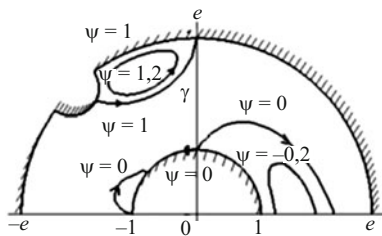


Рис. 3. Камера с выступом  $\omega_0 = 6,95$ ,  $\omega_1 = 1,5$

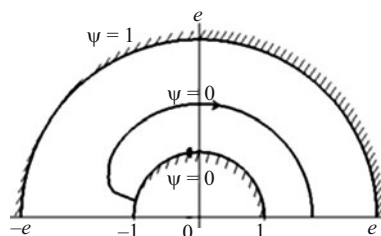


Рис. 4. Камера без выступа  $\omega_1 = 1,5$

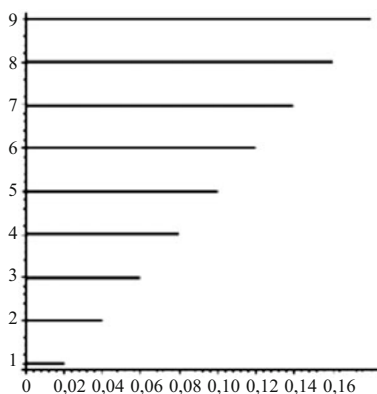


Рис. 5. Эпюры скоростей на входе в камере без выступа

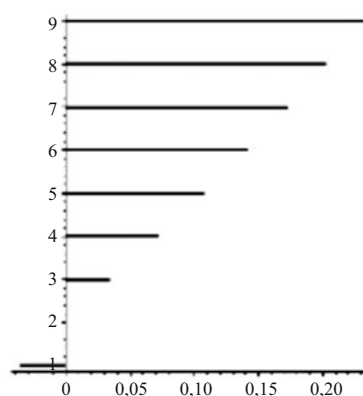


Рис. 6. Эпюры скоростей по оси ординат в камере без выступа

должна быть равна 1. Это дает нам еще одно интегральное уравнение относительно неизвестной линии  $\gamma$ . Решение данной задачи находим методом итераций для линии единичного уровня функции тока. После исправления кривой повторяем всю процедуру с построением оператора Грина. Данная схема обрабатывалась авторами для прямоугольных камер с выступом в работе [7], где численно найдена область отрывных течений. Дискретизация и интерполяция решений интегрального уравнения (4)

$$\psi_0(z_j) = \frac{1}{2\pi} \sum_i \frac{\partial}{\partial \eta} \psi_0(z_i) \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} \ln \frac{1}{|\zeta - z_j|} |d\zeta| - \frac{1}{2\pi} (-\pi \psi_0(z_j) + \sum_{i \neq j} \psi_0(z_i) \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} \frac{\partial}{\partial \eta} \ln \frac{1}{|\zeta - z_j|} |d\zeta|)$$

приводят к линейной системе уравнений относительно неизвестных значений гармонической функции и ее нормальной производной в точках  $z_j$ . Полученная линейная система уравнений решается в математическом пакете “Maple”. Отдельный вопрос — это точность полученных решений. Здесь нет нужды использовать интерполяцию аналитических функций на границе, как это выполнено в работе [8], достаточно стандартных методов.

**Результаты вычислений.** На рис. 3, 4 изображены построенные области отрывных течений в камере с выступом и без него для сравнения. На рисунках  $\psi = 0$  на нижней стенке камеры и  $\psi = 1$  (рас-

ходу жидкости) на верхней стенке. Функция тока на входе изменяется по формуле  $\psi = (r - 1)^2 / (e - 1)^2$ . Величина завихренности в области за выступом определяется итеративно (корректируется в процессе).

На рис. 3 течение жидкости состоит из двух зон с различными завихренностями. Внутри отрывной области построена дополнительная линия тока. Это течение согласовано с практическими измерениями. Действительно, наличие выступа позволяет погасить скорости на внешней стенке камеры по ее оси. Наличие выступа сдвигает область противотока с оси камеры. На рис. 5 и 6 приведены эпюры скоростей в створе камеры на входе и в створе по оси ординат камеры без выступа, соответствующие данным значениям параметров. Скорости вычисляются как приращения функции тока, поэтому они приведены в масштабе 1:10. На этих рисунках видно, что абсолютные величины скоростей практически не изменяются при движении потока жидкости по камере. По причине наличия области противотока, по оси камеры вблизи выпуклой стенки расчет дает отрицательные скорости.

На рис. 7, 8 даны эпюры скоростей на входе и по оси камеры при наличии выступа в том же масштабе. Наибольшие абсолютные величины скоростей стали меньше (примерно в 1,5 раза) и сместились с вогнутой стенки в середину камеры. Изменение скоростей недостаточно согласуется с опытом Н. Б. Городенского, видимо, из-за того, что по техническим (вычислительным) причинам форма вы-



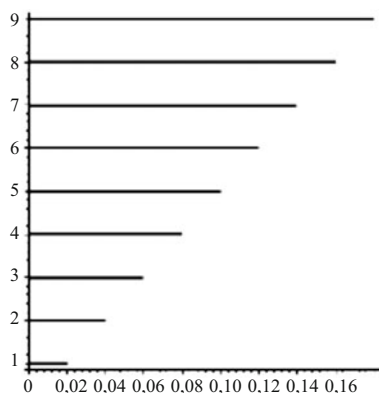


Рис. 7. Эпюры скоростей на входе в камере с выступом

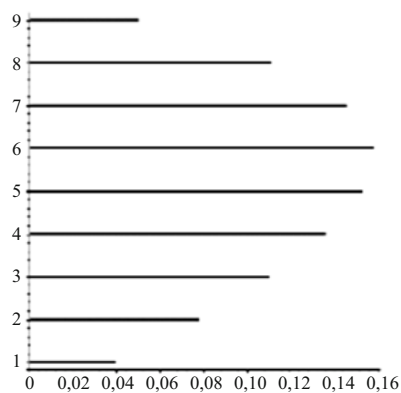


Рис. 8. Эпюры скоростей по оси ординат в камере с выступом

ступа в модели взята отличной от формы выступа из опыта. Еще один недостаток модели в том, что область противотока не полностью сдвигается при наличии выступа, а как бы разрывается на две части, что четко прослеживается на рис. 3. Авторы надеются произвести численные расчеты для других форм выступа, а также для областей, формы которых согласованы с реальными камерами.

#### Список литературы

1. *Городенский Н. Б.* Проектирование головных систем питания судоходных шлюзов на основе опыта гидравлических исследований (II. Альбом рисунков): Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1954.
2. *Городенский Н. Б., Эндер Г. В.* Гаситель вредных скоростей воды в выходных галереях судоходных шлюзов / А. с. № 36916, 31.05.1934.
3. *Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1977. 416 с.
4. *Гольдштик М. А.* Вихревые потоки. — Новосибирск: Наука (Сиб. отд.), 1981.
5. *Вайнштейн И. И.* Решение двух дуальных задач о склейке вихревых и потенциальных течений вариационным методом М. А. Гольдштика // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. 2011. 4(3). С. 320 – 331.
6. *Потапов Д. К.* Непрерывные аппроксимации задачи Гольдштика. // Математические заметки. 2010. Т. 87. Вып. 2. С. 262 – 266.
7. *Васин А. В., Тимофеева О. А.* Определение линии раздела областей с потенциальным и вихревым течениями // Журнал Университета водных коммуникаций. 2012. Вып. 2(14). С. 8 – 13.
8. *Васин А. В.* Граничная интерполяция в слабых классах Липшица // Исследования по линейным операторам и теории функций. 36: Записки научн. семинаров ПОМИ. СПб., 2008. Т. 335.

# Исследование устойчивости откоса плотины по пространственным поверхностям скольжения

Саинов М. П., кандидат техн. наук (МГСУ)

В плотинах, расположенных в узких горных ущельях, невозможно образование круглоцилиндрических поверхностей обрушения откосов. Предложено принимать поверхность скольжения в виде эллипсоида вращения, а распределение напряжений вдоль неё принимать по результатам расчётов напряжённо-деформированного состояния. Исследования, проведённые по такой схеме для плотины высотой 200 м, расположенной в створе шириной 400 м, показали, что за счёт пространственной формы поверхности скольжения устойчивость низового откоса при действии только сил собственного веса повышается примерно на 15 – 20 %. В узких створах на плотину могут действовать высокие сейсмические нагрузки, которые гораздо выше, чем для плотины бесконечной длины, и сильно снижают сейсмостойкость плотины. Учёт пространственной формы поверхности скольжения может помочь выявить дополнительные резервы устойчивости откосов плотины при сейсмических воздействиях.

**Ключевые слова:** устойчивость откоса плотины, поверхность скольжения, расчет устойчивости в пространственной постановке

Обеспечение устойчивости откосов — основной вопрос проектирования грунтовых плотин. Обычно задача об устойчивости решается на основе гипотезы о круглоцилиндрической поверхности скольжения. Считается, что массив обрушения бесконечен по длине, т.е. решается плоская задача. Но реальные грунтовые плотины всегда ограничены по своей протяжённости. Длина большинства грунтовых плотин много больше, чем их высота, для них расчёт по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения вполне логичен. Однако есть плотины, которые построены в узком горном ущелье (Ирганайская, Нурекская, проектируемая Рогунская), такие плотины работают в пространственных условиях.

В работе [1] показано, что в узких створах за счёт эффекта зависания грунта на скальных бортах происходит существенное перераспределение напряжений в теле плотины. Зависание грунта вызывает дефицит нормальных напряжений и рост касательных в теле плотины, что может неблагоприятно сказаться на устойчивости откосов. Кроме того, пространственные условия заметно влияют на сейсмостойкость плотины. У плотины, расположенной в узком каньоне, частоты собственных колебаний будут выше, чем у плотины бесконечной длины. За счёт приближения частот собственных колебаний к частотам вынужденных колебаний повышаются сейсмические нагрузки на плотину, расположенную в горном каньоне.

Перечисленные выше факторы неблагоприятно сказываются на устойчивости откосов плотины: увеличиваются нагрузки, стремящиеся нарушить устойчивость откоса, и снижается сопротивление грунтов сдвигу. С другой стороны, при расположении грунтовой плотины в узком каньоне невозможно образование круглоцилиндрической поверхности скольжения, она должна иметь пространственную форму. В этом случае площадь поверхности

скольжения вырастает, а следовательно, увеличиваются силы, удерживающие откос.

Таким образом, пространственный эффект неоднозначно сказывается на устойчивости откосов грунтовой плотины: можно ожидать как снижения запаса их устойчивости, так и его повышение. Данная работа посвящена исследованию этого влияния.

Чтобы исследовать влияние пространственных условий на устойчивость откосов, потребовалось разработать методику расчётов, которая позволяла бы вести расчёты в пространственной постановке. За основу методики взято предположение, что обрушение откоса происходит в виде поворота массива обрушения вокруг горизонтальной оси. В этом случае поверхность скольжения в поперечном сечении представляет собой дугу окружности. Второе предположение — в горизонтальном сечении поверхность скольжения является эллипсом. Таким образом, в пространственных условиях массив обрушения представляет собой эллипсоид вращения (или сфероид), полученный путём вращения эллипса вокруг горизонтальной оси.

Форма эллипсоида вращения характеризуется двумя характерными размерами — двумя полуосями. Одна из полуосей совпадает с радиусом дуги скольжения в поперечном сечении. Вторая полуось направлена вдоль оси вращения. В случае, если вторая полуось много больше, чем первая, поверхность скольжения становится близкой к круглоцилиндрической. Следовательно, используя данную форму поверхности скольжения, можно решать задачу об устойчивости как для плоских, так и для пространственных условий.

Поверхность эллипсоида описывается каноническим уравнением

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{a^2} + \frac{(z-z_0)^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где  $x$  — координата, направленная горизонтально, в направлении из верхнего бьефа в нижний;  $y$  — высота точки;  $z$  — координата вдоль оси вращения эллипсоида;  $a, b$  — полуоси эллипса;  $x_0, y_0, z_0$  — координаты центра эллипсоида.

Условие устойчивости записывается в виде сравнения удерживающих  $M_{\text{удерж}}$  и опрокидывающих моментов  $M_{\text{опр}}$

$$M_{\text{опр}} \leq M_{\text{удерж}}. \quad (2)$$

Используя формулу Кулона для подсчёта сил сопротивления сдвигу, получим выражение для подсчёта коэффициента запаса устойчивости откоса

$$k_{\text{уст}} = \frac{\sum_{j=1}^N [(\sigma_{n,j} \operatorname{tg} \varphi_j + c_j) \omega_j r_j]}{\sum_{i=1}^K [G_i r_{gi} + S_i r_{si}]}, \quad (3)$$

где  $j, N$  — соответственно номер элементарной площадки поверхности скольжения и их общее количество;  $i, K$  — соответственно номер элементарного объёма в составе массива обрушения и их общее количество;  $\sigma_{n,j}$  — напряжение в скелете грунта на  $i$ -той элементарной площадке поверхности скольжения в направлении нормали к площадке;  $\varphi_j, c_j$  — соответственно угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта, попадающего на  $j$ -той элементарной площадке в поверхность скольжения;  $\omega_j$  — площадь  $j$ -той элементарной площадки поверхности скольжения;  $r_j$  — плечо центра тяжести  $j$ -той элементарной площадки относительно оси вращения;  $G_i$  — вес грунта в  $i$ -том элементарном объёме массива обрушения;  $r_{Gi}$  — плечо силы тяжести  $i$ -того элементарного объёма относительно оси вращения;  $S_i$  — горизонтальная (сейсмическая) сила в  $i$ -том элементарном объёме массива обрушения;  $r_{Si}$  — плечо силы  $S_i$  относительно оси вращения.

Как видно из формулы (3), для подсчёта опрокидывающего момента необходимо разбить массив обрушения на ряд элементарных объёмов, а для подсчёта удерживающего момента — разделить поверхность скольжения на элементарные площадки. Подобным же образом чаще всего поступают при расчёте устойчивости методом круглоцилиндрических поверхностей, разбивая массив обрушения на вертикальные отсеки-столбики [2].

Для выявления наиболее опасной поверхности скольжения необходимо рассмотреть множество

поверхностей скольжения с разными центрами ( $x_0, y_0, z_0$ ) и разными полуосями ( $a, b$ ) и выбрать из них ту, которая имеет минимальный коэффициент запаса.

Сложность расчёта по формуле (3) состоит в том, что в любой точке поверхности скольжения необходимо знать нормальные напряжения  $\sigma_n$  в нормальном (к поверхности) направлении. В плоской задаче, в методе круглоцилиндрических поверхностей скольжения, обычно используют гипотезу отвердевшего массива обрушения (способ Терцаги) [2] и получают, что напряжения в нормальном направлении  $\sigma_n$  можно выразить через вертикальные нормальные напряжения  $\sigma_y$  и угол  $\alpha$  наклона площадки к горизонту:

$$\sigma_n = \sigma_y \cos \alpha. \quad (4)$$

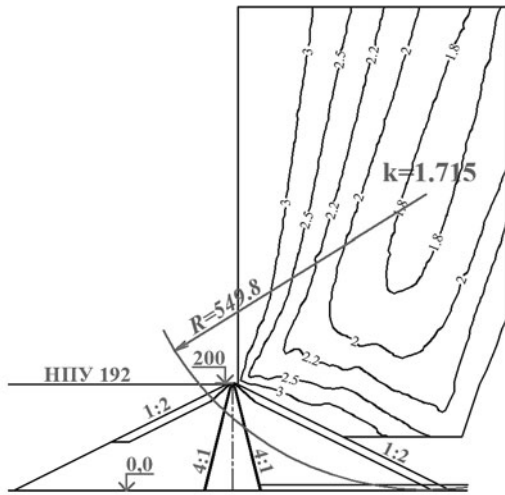
Как известно [3–5], способ Терцаги не удовлетворяет условиям равновесия сил, действующих на массив обрушения, что снижает точность решения. Разработано множество других способов расчёта [2, 3, 5], в которых напряжения находят из рассмотрения предельного равновесия массива обрушения. Эти способы довольно сложны, тем не менее не дают точного результата.

В пространственной задаче определить напряжение  $\sigma_n$  ещё сложнее. Поэтому нами было решено отказаться от рассмотрения состояния предельного равновесия массива обрушения и определять поле распределения напряжений для действительного напряжённо-деформированного состояния (НДС) грунтовой плотины. Решив задачу о напряжённо-деформированном состоянии плотины численным методом конечных элементов, мы узнаём в любой точке все компоненты тензора напряжений, а следовательно можем определять напряжения на любой площадке. Следует отметить, что в этом случае распределение напряжений в массиве обрушения будет удовлетворять любым условиям равновесия, что делает решение достаточно точным.

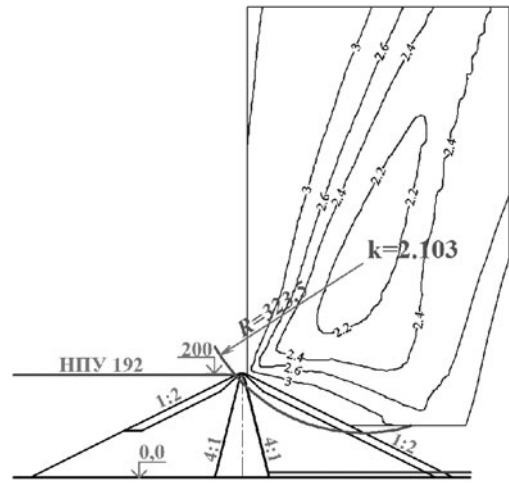
Описанная выше методика\* расчёта была реализована в составленной автором вычислительной программе. С её помощью были проведены исследования устойчивости откосов каменно-земляной плотины высотой 200 м и длиной по гребню 400 м. Длина створа на отметке дна составляла 50 м. Упорные призмы плотины выполнены из гравийно-галечникового грунта и покрыты слоем горной массы. Заложение откосов плотины было принято равным 2.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния плотины производился по вычислительной

\* В статье описаны наиболее общие вопросы методики расчёта устойчивости откосов в пространственной постановке в силу ограниченности объёма статьи.

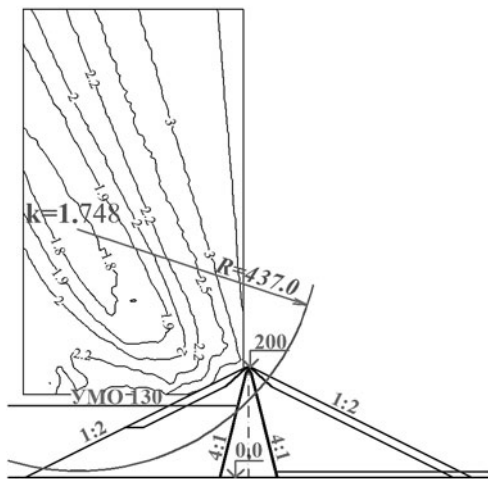


**Рис. 1.** Результаты расчёта устойчивости низового откоса сечения плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения (при основном сочетании нагрузок)



**Рис. 3.** Результаты расчёта устойчивости низового откоса плотины по эллипсоидным поверхностям скольжения (при основном сочетании нагрузок)

программе NDS-N, разработанной автором. Она позволяет вести расчёт в упругопластической постановке, для чего используется модель грунта профессора Л. Н. Рассказова [2].



**Рис. 2.** Результаты расчёта устойчивости верхового откоса сечения плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения (при основном сочетании нагрузок)

При расчётах устойчивости учитывалось снижение угла внутреннего трения гравийно-галечникового грунта при росте напряжений от 0 до 5 МПа с 47 до 34° (табл. 1).

Расчёты устойчивости низового откоса проводились для случая полностью наполненного водохранилища (до НПУ = 192 м), а верхового — для случая сработки водохранилища до УСВ 130 м.

Расчёты в плоской постановке (круглоцилиндрическая поверхность скольжения) показали, что откосы плотины обладают большим запасом устойчивости. Минимальный коэффициент устойчивости низового откоса составил 1,715 для расчёта, в котором  $\sigma_n$  выражались через компоненты тензора напряжений, а при использовании формулы (4) — 1,805. В обоих случаях положение наиболее опасной кривой скольжения было одинаковым. Её радиус составил 550 м (рис. 1). Массив обрушения охватывал всю высоту низового откоса. Минимальный коэффициент устойчивости верхового откоса составил 1,748 (рис. 2).

Расчёт НДС (напряжённо-деформированного состояния) плотины в пространственной постановке

Т а б л и ц а 1

Свойства грунтов тела плотины, использованные в расчёте

Грунт	Плотность, т/м <sup>3</sup>		Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	
	в сухом состоянии	в насыщенном водой состоянии		при нулевых напряжениях	при напряжениях 2 МПа
Суглинок	1,78	2,14	25	20	20
Гравийно-галечниковый	2,20	2,36	0	48	36
Горная масса	2,03	2,27	0	54	34
Песок со щебнем	1,80	2,13	0	34	34



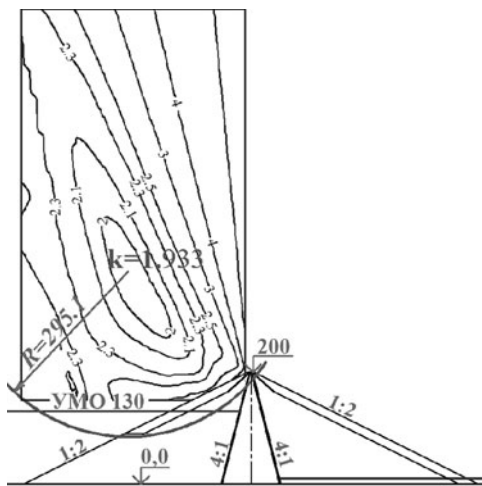


Рис. 4. Результаты расчёта устойчивости верхового откоса плотины по эллипсоидным поверхностям скольжения (при основном сочетании нагрузок)

ке показал, что в створе с коэффициентом створа 2 отчётливо проявляется эффект зависания грунта на скальных бортах. Если в расчёте устойчивости плоского сечения учесть распределение напряжений, полученное в результате решения задачи о пространственном НДС, то коэффициенты запаса устойчивости изменятся незначительно. Можно сказать, что в русловом сечении распределение напряжений оказалось близким к плоскому.

Расчёт устойчивости в пространственной постановке показал, что запас устойчивости откосов плотины существенно выше по сравнению с плоской задачей. Минимальный коэффициент устойчивости низового откоса составил 2,103 (рис. 3), а верхового — 1,933 (рис. 4). В обоих случаях опасные поверхности скольжения оказались сферическими и охватили верхнюю часть плотины. Радиус поверхности скольжения низового откоса составил 323,5 м (рис. 3), а верхового — 295,1 м (рис. 4).

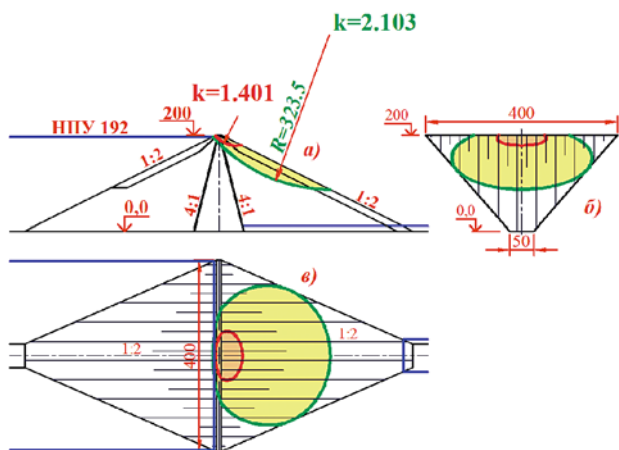


Рис. 5. Контуры возможных пространственных массивов обрушения низового откоса плотины: а — в русловом сечении; б — на виде с нижнего бьефа; в — на плане; зелёным цветом обозначена граница массива обрушения при основном сочетании нагрузок, красным — с учётом сейсмического воздействия

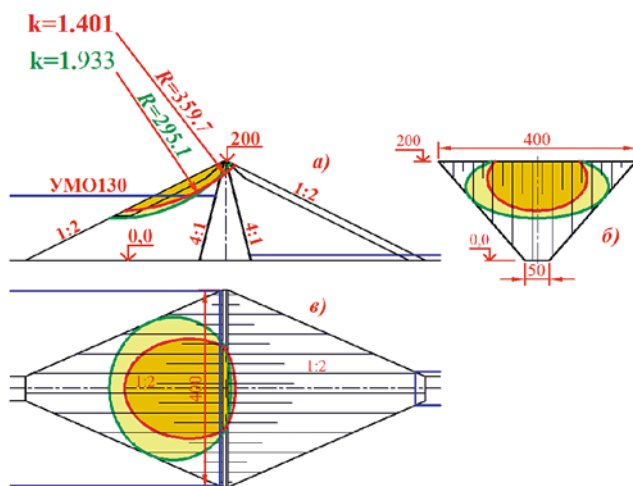


Рис. 6. Контуры возможных пространственных массивов обрушения верхового откоса плотины: а — в русловом сечении; б — на виде с верхнего бьефа; в — на плане; зелёным цветом обозначена граница массива обрушения при основном сочетании нагрузок, красным — с учётом сейсмического воздействия

Повышение запаса устойчивости объясняется тем, что объём массива обрушения в пространственных условиях ограничен скальными бортами (рис. 5, 6). Поверхности скольжения прошли максимально близко к скальным бортам, так как из-за зависания на бортах уровень сжатия в прибортовой зоне меньше, чем в русловой. В обоих случаях поверхность скольжения не затронула подошву плотины, а массив обрушения в русловом поперечном сечении оказался существенно меньше по площади, чем при расчёте методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Таким образом, мы получили, что учёт пространственных условий формирования массива обрушения привёл к повышению коэффициента устойчивости низового откоса на 23 %, а верхового — на 11 %. Особенно важно, что форма опасной

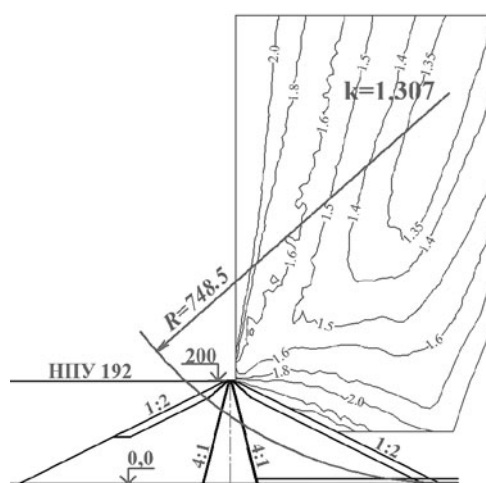
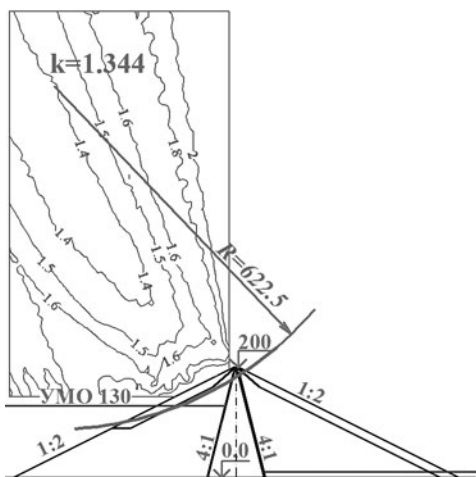
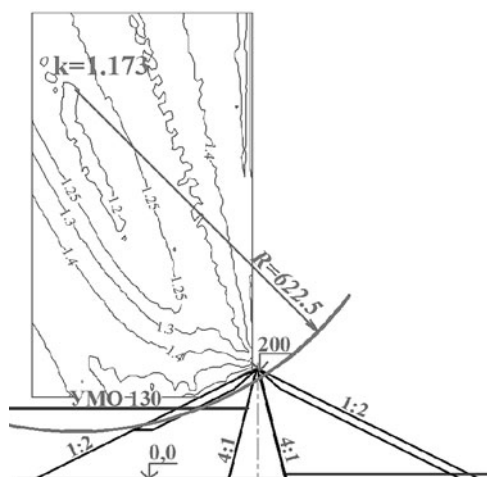


Рис. 7. Результаты расчёта устойчивости низового откоса сечения плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения (с учётом сейсмического воздействия, полученного для плоских условий)





**Рис. 8.** Результаты расчёта устойчивости верхнего откоса сечения плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения (с учётом сейсмического воздействия, полученного для плоских условий)



**Рис. 10.** Результаты расчёта устойчивости верхнего откоса сечения плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения (с учётом сейсмического воздействия, полученного для пространственных условий)

поверхности скольжения оказалась сферической. Это показывает неправомочность использования в рассматриваемых условиях круглоцилиндрической формы поверхности скольжения.

До сих пор мы рассматривали устойчивость откосов плотины в узком горном каньоне без учёта сейсмических сил. Однако именно в горных ущельях плотины испытывают сейсмические воздействия. В наших исследованиях был произведён расчёт сейсмостойкости плотины при 9-балльном землетрясении, в котором ускорение основания составляет  $0,48g$  и направлено вдоль русла из верхнего бьефа в нижний.

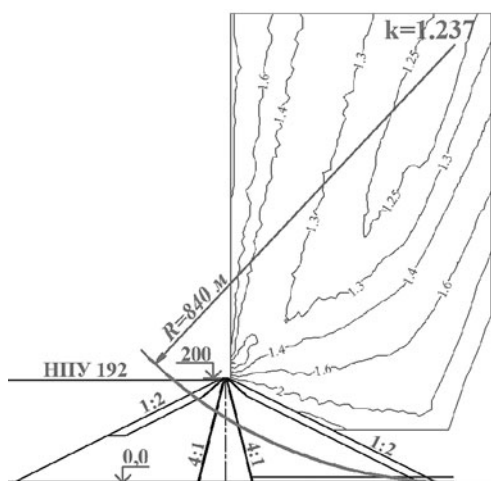
Расчёт сейсмических нагрузок производился по линейно-спектральной методике, для чего потребовалось определить 50 низших форм собственных колебаний плотины. При расчётах учитывался рост динамических характеристик с глубиной. Расчёт

показал, что периоды форм собственных колебаний в пространственных условиях существенно ниже, чем в плоских, они ближе к резонансным (табл. 2). Это привело к тому, что ускорение гребня русловой плотины в пространственной задаче оказалось более чем на 20 % выше ( $0,44g$ ), чем в плоской задаче ( $0,36g$ ).

Это сказалось на устойчивости откоса при сейсмическом воздействии. В плоской задаче коэффициент устойчивости низового откоса составил 1,307 (рис. 7), т.е. на 24 % ниже, чем при основном сочетании нагрузок. Коэффициент устойчивости верхнего откоса составил 1,344 (рис. 8), снизившись на 17 %.

Как уже было сказано, в пространственных условиях на русловое сечение действуют более высокие сейсмические нагрузки. Если в плоской задаче при расчёте устойчивости руслового сечения плотины учесть действующие сейсмические силы из пространственной задачи, то коэффициент устойчивости низового откоса составит лишь 1,237 (рис. 9), а верхнего — 1,173 (рис. 10). Это примерно на 30 % меньше, чем без учёта сейсмического воздействия. Но самое важное, что коэффициент устойчивости верхнего откоса опустился ниже нормативного (1,184 для способов, не учитывающих равновесие массива обрушения в состоянии предельного равновесия). Таким образом, учёт пространственного характера формирования нагрузок существенно повлиял на запас устойчивости. Это подчёркивает важность соблюдения расчётной схемы сооружения.

Поэтому логично при расчёте учесть пространственность не только при определении нагрузок, но и при определении формы обрушения. Как было показано ранее, в данном створе невозможно объёмное обрушение откоса по круглоцилиндрической



**Рис. 9.** Результаты расчёта устойчивости низового откоса сечения плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения (с учётом сейсмического воздействия, полученного для пространственных условий)

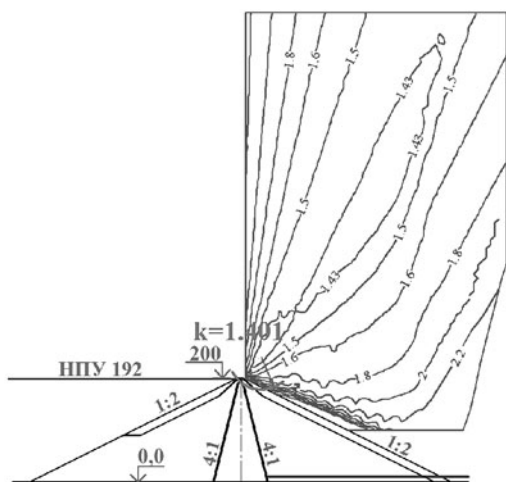


Рис. 11. Результаты расчёта устойчивости низового откоса плотины по эллипсоидным поверхностям скольжения (с учётом сейсмического воздействия)

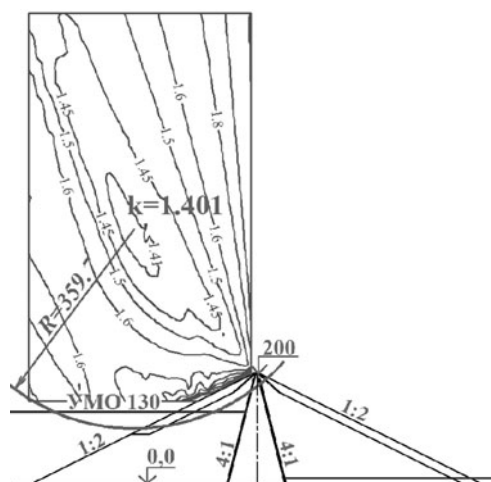


Рис. 12. Результаты расчёта устойчивости верхового откоса плотины по эллипсоидным поверхностям скольжения (с учётом сейсмического воздействия)

поверхности скольжения. По этой причине рассмотрим результаты расчёта устойчивости по эллипсоидным поверхностям скольжения.

Расчёт устойчивости в пространственной постановке показал, что учёт сейсмических сил очень существенно, примерно на треть, снизил коэффициент устойчивости откосов. Однако, так как для пространственных поверхностей скольжения при основном сочетании минимальный коэффициент устойчивости был очень высоким (около 2), то и при сейсмическом воздействии запас устойчивости остался значительным.

Коэффициент устойчивости низового откоса составил 1,401 (рис. 11). Массив обрушения затронул только гребень плотины, его русловую часть, где действуют максимальные сейсмические ускорения. В поперечном сечении радиус поверхности скольжения составил 62,5 м, а другая полуось эллипсоида — 90 м (рис. 5). Плановые размеры массива обрушения составили 55 и 101 м.

Коэффициент устойчивости верхового откоса также составил 1,401 (рис. 12). Массив обрушения оказался более значительным по объёму. Его радиус в поперечном сечении составил 359,7 м, а вторая полуось — 248 м. Плановые размеры массива обрушения составили 201,5 и 224 м.

Для обоих откосов опасные поверхности скольжения не коснулись скальных бортов и затронули только русловую часть плотины. Форма поверхностей скольжения оказалась различной. Поверхность скольжения низового откоса вытянута вдоль гребня (с соотношением полуосей 1,44), а поверхность скольжения верхового откоса вытянута вдоль русла (с соотношением полуосей 0,69).

Следует отметить, что полученные коэффициенты запаса устойчивости откоса пространственных поверхностей скольжения (1,401) всего на 4–7% отличаются от полученных методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения для плоских условий (1,307 для низового откоса, 1,344 для верхового откоса). Конечно, такое отличие невелико, но следует иметь в виду, что плоские условия полностью не соответствуют расчётной схеме работы плотины и полученная близость значений — совпадение. Отличие коэффициентов устойчивости, полученных для нагрузок основного сочетания нагрузок, гораздо более значительное — 10–25%.

Таким образом, учёт пространственных условий формирования сейсмических нагрузок и формирования возможного массива обрушения существенно сказывается на оценке устойчивости откоса грунтовой плотины, расположенной в узком

Т а б л и ц а 2

Периоды низших форм собственных колебаний плотины с преобладающим направлением колебаний вдоль русла

Плоская задача	Номер	1	3	4	5	7	9	11	12	14	15
	Период, с	0,973	0,536	0,488	0,445	0,388	0,344	0,312	0,299	0,282	0,269
Пространственная задача	Номер	1	3	4	5	7	8	9	11	16	17
	Период, с	0,683	0,520	0,494	0,436	0,419	0,405	0,399	0,381	0,343	0,340

створе. В пространственных условиях устойчивость откоса может оказаться не обеспеченной при сейсмическом воздействии. Для таких плотин нельзя ограничиваться расчётами устойчивости откосов только в плоской постановке.

В нашем случае расчёт по пространственным поверхностям скольжения позволил выявить запас устойчивости откоса, по сравнению с тем, что даёт метод круглоцилиндрических поверхностей (рис. 9, 10) скольжения для руслового сечения плотины. Коэффициент устойчивости верхового откоса плотины возрос на 19 %, а низового — на 13 %.

## Выводы

1. Разработана методика расчётов, которая позволяет определять запас устойчивости откосов для пространственной, некруглоцилиндрической поверхности скольжения.

2. В плотинах, расположенных в узких горных ущельях образование круглоцилиндрической поверхности скольжения маловероятно, так как скальные борта ограничивают массив обрушения. Для рассмотренной плотины у наиболее опасной пространственной поверхности скольжения коэффициент запаса устойчивости на 15–20 % выше, чем у круглоцилиндрической. Расчёт устойчивости

по пространственным поверхностям скольжения позволяет выявить дополнительные резервы устойчивости откоса.

3. Расположение плотины в узком горном ущелье существенно усиливает сейсмическое воздействие на русловую часть плотины по сравнению с расположением в широком створе, поэтому у такой плотины сейсмическое воздействие более существенно снижает запас устойчивости, чем при плоских условиях. Повышенные сейсмические нагрузки могут вызывать нарушение устойчивости откоса плотины со сложной формой массива обрушения.

## Список литературы

1. Саинов М. П., Карбивник Н. А. Устойчивость откосов грунтовой плотины с учётом пространственных условий восприятия нагрузок // Гидротехническое строительство. 2010. № 11.
2. Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин. — М.: Изд-во АСВ, 2001. 384 с.
3. Маслов И. А. Аналитический метод расчёта устойчивости откосов. // Гидротехническое строительство. 1989. № 12.
4. Бухарцев В. Н. Общий метод расчёта устойчивости грунтовых откосов в рамках плоской задачи // Гидротехническое строительство. 1983. № 11. С. 28–32.
5. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения. — Л.: Энергия, 1967. 460 с.

## Системные причины аварий

Кудрявый В. В., доктор техн. наук

Рассмотрены итоги расследования Саяно-Шушенской катастрофы 17 августа 2009 г. Проанализированы факторы и причинно-следственные связи, приведшие к аварии.

**Ключевые слова:** Саяно-Шушенская катастрофа, турбина, гидроагрегат № 2, усталостные трещины на шпильках, предел прочности, вибрация, nereкомендованные зоны работы.

### Итоги расследования аварии по Саяно-Шушенской ГЭС

После Саяно-Шушенской катастрофы 17 августа 2009 г. прошло более трех лет. Срок достаточный для взвешенных выводов о причинах и необходимых мерах для предупреждения столь трагических событий.

Расследование уголовного дела закончено в июне 2012 г. Следственный комитет РФ передал материалы в Прокуратуру РФ, в которых вина за произошедшую аварию, унесшую жизни 75 сотрудников, возложена на руководящий и эксплуатационный персонал гидроэлектростанции: директора, главного инженера, обоих его заместителей и трех сотрудников службы мониторинга оборудования Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС).

Материалы уголовного дела составили более 1200 томов. В обвинительном заключении приведены более 20 статей, параграфов и пунктов законодательных, нормативных актов и инструкций, которые нарушили обвиняемые. Суть обвинения заключается в следующем: **длительная эксплуатация гидроагрегата № 2 с недопустимой вибрацией и принятие мер по выводу его из работы для устранения вибрации.** Обобщенное содержание нарушений многочисленных статей и параграфов выражается в том, что **работодатели и сотрудники инженерных служб эксплуатирующейся электростанции не выполнили требований нормативных актов, возлагающих на них ответственность за обеспечение безопасных условий труда для наемных работников при производстве работ.**

### Относительно сути обвинения

Все данные о высокой вибрации, достигшей около 840 мкм на подшипнике турбины гидроагрегата № 2, базируются на показателях всего одного датчика. Но в практике анализа вибрационного состояния любого вращающегося механизма исключен вариант, чтобы кратное увеличение вибрации на одном подшипнике не сказывалось на соразмерном росте вибрации на других. В данном случае

превышение вибрации на других подшипниках сверх допустимого уровня не зафиксировано. Кроме этого, есть и другие доказательства неработоспособности датчика вибрации подшипника гидротурбины № 2 в период, предшествующий аварии.

На остановленном гидроагрегате № 2 за сутки до аварии зафиксирована вибрация около 80 мкм. Обычно на остановленных гидроагрегатах вибрация, передающаяся через фундаментное основание от работающих гидроагрегатов, не превосходит 10 – 20 мкм. Кратное увеличение вибрации на остановленной турбине № 2 также свидетельствует о неисправности датчика.

Показания датчика биения вала стационарной системы виброконтроля, измерявшего биение вала в том же направлении, что и неисправный датчик вибрации, практически не изменялись за время работы гидроагрегата № 2 после проведенного ремонта в марте 2009 г. Это подтверждает неисправность датчика вибрации.

При эксплуатации гидроагрегатов СШГЭС эксплуатационный персонал дважды в смену измерял биение вала, допустимое значение которого составляло 0,6 мм. Данное измерение фактически является измерением двойной амплитуды перемещения вала на частоте вращения. За время работы гидроагрегата № 2 после проведенного ремонта в марте 2009 г. недопустимого значения биения вала не было зафиксировано. Необходимо отметить, что измерение биения вала по всем гидроагрегатам СШГЭС является наиболее точным механическим измерением, на которое не влияют ни высокочастотные силовые импульсы, ни наводки в электрических схемах датчика. За длительный период эксплуатации десяти гидротурбин СШГЭС биение вала фактически было основным индикатором симптомов нарушения. Стабильность биения вала, измеряемого механическим индикатором часового типа с ценой деления 10 мкм, после проведенного ремонта в марте 2009 г. также свидетельствует о неисправности датчика вибрации.

В 2010 – 2011 гг. после восстановления гидроагрегатов № 3, 4, 5, 6 на них была включена защита



от повышения вибрации, что потребовало жесткого контроля исправности датчиков. За 10 месяцев было выявлено 15 неисправностей датчиков вибрации, вызванных, по мнению фирмы-изготовителя, постоянным, разнонаправленным динамическим воздействием импульсов сил от потока воды, срывающегося с лопаток рабочего колеса.

Центральным котлотурбинным институтом (ОАО «ЦКТИ») по договору с Саяно-Шушенской ГЭС в 2011 г. был проведен анализ сохранившейся информации вибрационного состояния гидроагрегата № 2 до аварии, который позволил ведущему институту энергомашиностроения сделать вывод, что персонал СШГЭС не мог предусмотреть возможность аварии ни по результатам измерения вибрации переносным прибором, ни по величине биеения вала, контролируемого дежурным персоналом, ни по результатам мониторинга вибрационного состояния стационарной системы.

**На основании изложенного некорректным является использование сохранившихся показателей измерений вибрации подшипника гидроагрегата № 2 по одному датчику для определения причин произошедшей аварии и виновности в этой аварии персонала Саяно-Шушенской ГЭС.**

#### **О невыполнении нормативных документов**

Огромный объем названных в обвинительном заключении нарушений на одной из лучших гидроэлектростанций отрасли поражает специалистов, работающих в электроэнергетике. Возможно, содержание невыполненных статей, параграфов, пунктов в основном повторяет и конкретизирует должностную ответственность работодателей и сотрудников или уточняет их функциональные обязанности с учетом особенностей уголовного дела. Однако создается общее впечатление безысходности для обвиняемых и тщетности надежд на глубокое и объективное расследование. Возложение ответственности за Саяно-Шушенскую аварию, потребовавшую коренной модернизации турбины, технической части проекта СШГЭС и ужесточения нормативных требований по надежности, только на инженерную элиту гидроэлектростанции не убеждает инженеров-энергетиков.

#### **Возникают и дополнительные вопросы, например:**

Какие инстанции должны своевременно контролировать соблюдение многочисленных пунктов и статей?

Почему нет всесторонней экспертной оценки момента и факторов усталости металла шпилек — основной причины аварии?

Почему не рассмотрено невыполнение Акта госкомиссий о замене рабочих колес, обеспечивающих реальное предотвращение аварии?

#### **Системный характер аварии**

Эти и другие проблемы, проявившиеся при расследовании аварии, не могут быть решены без комплексного рассмотрения всех факторов, приведших к Саяно-Шушенской катастрофе.

Системный характер аварии де-юре подтвержден 30 экспертами Рабочей группы под председательством Н. И. Рыжкова (Комитет по энергетике Совета Федерации) и Ю. Д. Маслокова (Комитет по промышленности Государственной Думы). Заключение рабочей группы экспертов (№ вн-ЮМ-3/7 от 16.11.2009) было передано сопредседателю Парламентской комиссии В. А. Пехтину. К сожалению, отчет Рабочей группы не был приложен к заключению Парламентской комиссии, а фрагментарное использование материалов Рабочей группы привело к тому, что мнение экспертов о системной причине аварии было проигнорировано.

Однако анализ мероприятий предложенных в рекомендации Парламентской комиссии, де-факто показывает, что их содержательная часть многократно превосходит компетентность эксплуатационного персонала Саяно-Шушенской ГЭС. Выводы и меры по предотвращению подобных аварий объективно свидетельствуют: **решения основных вскрытых проблем находились в энергохолдинге РАО «ЕЭС России» и на государственном уровне, включая Правительство и Парламент, что фактически подтверждает системный характер аварии.**

За прошедшие три года появились дополнительные данные по протеканию аварии, подняты материалы о крайне тяжелых режимах работы гидроагрегата № 2 в 1981 – 1983 гг. с временным рабочим колесом. В этот же период фирма-изготовитель турбины и головной проектный институт разработали и реализовали радикальные комплексные меры, исключающие повторение подобной аварии. Важнейшими из них являются изготовление новых рабочих колес с лучшими гидродинамическими характеристиками и дополнительное усиление конструкции крышки турбины и шпилек. Проведенные в 2011 – 2012 гг. испытания гидротурбин с новыми рабочими колесами подтвердили эффективность принятых конструктивных решений. Принципиальные изменения по схемам электроснабжения, системам управления аварийно-ремонтным затвором и направляющего аппарата, а также включение в работу двух новых защит (от повышения вибрации и от повышения уровня воды на крышке турбины)кратно увеличили надежность и безопасность рабо-



ты гидроэлектростанции. **Этим самым также подтверждено, что решение проблемы безаварийной работы, позволяющее исключить подобные аварии, содержалось в организации совместной системной работы конструкторов, технологов, проектировщиков и эксплуатационников, но никак не входило в зону ответственности и компетентности лишь руководителей Саяно-Шушенской ГЭС.**

Такой комплексный подход к решению проблем в электроэнергетике не является чем-то необычным и чужеродным для отрасли, он всегда был естественным, общепринятым методом анализа. Это связано с тем, что по академическим понятиям электроэнергетика — это классическая большая управляемая система. К таким системам относятся сложные технологические комплексы с взаимосвязанными и взаимозависимыми быстропротекающими процессами. В таких системах категорически не допускается применять фрагментарный анализ и соответственно локальные меры для решения возникающих проблем, создающих угрозу безопасной эксплуатации. Особенностью электроэнергетики является не только внутриотраслевые связи, но и длительная зависимость надежности, техники, технологии и энергообъектов в целом от решений, использованных научно-производственными комплексами смежных отраслей (энергомашиностроение, электротехника, приборостроение, проектирование, строительство).

При эксплуатации действующих энергообъектов возможность предотвращения аварий будет определяться следующими мерами, обеспечивающими дееспособность системы управления:

соответствием компетенции руководящего персонала на верхнем уровне управления реальной сложности и приоритетности проблем, подлежащих решению на их уровне, при оптимизации централизованных и децентрализованных функций;

способностью верхнего уровня управления воспринимать реальные последствия принятых ими решений через регулярную, информационную обратную связь с мест;

постоянным научно-техническим сопровождением режимов работы энергоагрегатов для оценки влияния предыдущих периодов работы на рабочий ресурс конструкций и оборудования, а также определения сроков диагностики оборудования, способных предотвратить аварии и обеспечить безопасность персонала.

**Отказ от системного подхода не позволяет решить вопросы, которые возникают сегодня по результатам следствия:**

если на гидроагрегате № 2 до аварии была недопустимая вибрация, последствия которой так разрушительны и опасны для персонала и электро-

станции, то почему ни один регламентирующий документ не предусматривал дефектации шпилек на отсутствие усталостных трещин и почему ни один гидроагрегат не был оснащен защитой от превышения вибрации? Более того, на момент аварии отсутствие защиты от превышения вибрации не являлось отклонением от действующих норм и правил. **Как вообще можно предъявлять требование к эксплуатации в части точности систем измерения вибрации, если в России нет ни одной аттестованной системы измерения вибрации для гидроэнергетики;**

обрыв шпилек крепления крышки турбины и выброс ее в машзал, конечно, неординарное событие, но оно не переросло бы в катастрофу такого масштаба, если бы полноценно сработали защиты, действующие на перекрытие напорной воды, хлынувшей в машзал. Однако ни направляющий аппарат (НА) (**время закрытия 30 с**), ни аварийно-ремонтный затвор (АРЗ) (**время закрытия 3 мин**) не закрылись. Первый — потому что был встроен в крышку турбины, оторвавшуюся после разрушения шпилек, второй — из-за потери напряжения в системе собственных нужд, обеспечивающий работу привода аварийного затвора. В результате отказа НА и АРЗ увеличение времени затопления машзала в 100 раз привело к катастрофическому развитию аварии. **Однако комиссии по расследованию не нашли нарушения действующих до 17 августа 2009 г. норм в проекте эксплуатирующихся на СШГЭС системах защит гидроагрегатов, обеспечивающих перекрытие напорной воды;**

меры по предотвращению аварий, предложенные в Акте комиссии Ростехнадзора, значительно ужесточают существующие нормативные требования для типовых проектов. Это, безусловно, необходимое решение, но принятое уже после аварии.

Во исполнение этого фирмой-изготовителем и генеральным проектировщиком разработаны и реализованы новые конструктивные решения по турбине, системе ее защит и безопасности персонала. Эти мероприятия устранили упущения в нормативной документации прошлых лет, в которых не было полноценных требований, обеспечивающих надежность и безопасность оборудования ГЭС. Это касается:

конструктивных и компоновочных решений по датчикам вибрации, работающим в условиях хаотичных силовых импульсов;

схемы электроснабжения направляющего аппарата при потере напряжения на регуляторе скорости;

резервирования электроснабжения привода аварийных затворов при одновременной потере собственных нужд ГЭС и обесточения ОРУ-500 кВ;

внедрения системы постоянного контроля состояния шпилек крепления крышки турбины;

отказа от размещения ответственного электрооборудования и помещений для персонала на затопляемых отметках и др.

**Столь радикальные изменения первоначальной документации свидетельствуют о запроектном характере аварии, что, тем более, требует комплексного системного подхода к разработке мер, предотвращающих подобные катастрофы.**

### **Необходимость совершенствования нормативных баз**

Особенностью беспрецедентной аварии на Саяно-Шушенской ГЭС является то, что она фактически произошла при соблюдении норм, действующих в период создания и освоения техники по основным этапам:

- создание электростанции;
- разработка и изготовление оборудования;
- проектирование и строительство ГЭС;
- эксплуатация и техническое обслуживание.

Конечно, в период создания головных гидроагрегатов и проектов уникальных ГЭС невозможно все предусмотреть на десятилетия (по оборудованию) и на век вперед (по плотине). **Именно поэтому научно-исследовательские работы, направленные на обеспечение надёжности и безопасности ГЭС и оборудования, являются неотъемлемой частью производства электроэнергии на ГЭС. Что, в свою очередь, включает необходимость постоянного проведения исследовательских работ по наблюдениям за гидротехническими сооружениями** (такая система на ГЭС сохранена), **а также научно-техническое сопровождение эксплуатации и технического обслуживания оборудования** (в 2000 г. прекратилось). Только так можно получать знания, служащие исходной базой для разработки дополнительных нормативных требований предотвращения аварий.

Сегодня задача состоит в том, чтобы восстановить систему совершенствования нормативной базы надежности не только вследствие тяжелых аварий, но и благодаря упреждающей системе постоянного анализа, переходных режимов работы оборудования, уточнения методов и объемов регламентной диагностики. Очень модное сегодня направление технического обслуживания — “ремонт по состоянию оборудования” без этого внедрять недопустимо, так как отсутствие полноценной диагностики будет лишь провоцировать аварии.

**Необходимы срочные меры по восстановлению в отрасли системы научно-технического сопровождения эксплуатации энергооборудования, в первую очередь уникального по своим па-**

**раметрам и режимам.** Такая система должна быть основана на четких границах компетенции, которыми должны руководствоваться фирмы-изготовители, проектные институты, эксплуатирующие компании и экспертные инстанции государства при внедрении новой техники и контроля надежности жизненного цикла энергооборудования на объектах.

После начала эксплуатации энергообъекта основным документом, позволяющим обеспечить безопасный ресурс работы, должен быть документ по соблюдению разрешенных режимов работы и соответствию установленных параметров безопасности (вибрация, изгиб вала, перемещение ротора относительно статора и другие) значениям, определенным фирмами-изготовителями и проектными институтами. Регламент технического обслуживания должен, в свою очередь, включать: виды ремонта, объемы работ, сроки их проведения, с учетом рекомендованных способов контроля металла, узлов, обеспечивающих прочностные характеристики конструкции.

Игнорирование системных причин аварии приводит к тому, что задачей расследования становится выявление конкретных неисполнений статей нормативных актов руководителем на конкретном объекте. При таком подходе делается акцент на итоговой эксплуатационной деятельности перед аварией без учета всего комплекса взаимовлияющих факторов за жизненный цикл гидроагрегата.

### **Зарубежный опыт предотвращения аварий**

Далеко не всегда меры по обеспечению надежности энергооборудования, прямо влияющие на безопасность персонала энергообъектов, находятся в компетенции персонала эксплуатируемого энергообъекта.

Уже более 15 лет все ведущие фирмы-изготовители (“Siemens”, “General Electric”, “Alstom”), используя прогресс в спутниковой связи, обеспечивают непрерывную передачу в центральные офисы основных показателей работы энергоблоков. Это позволило взять под контроль в любой стране параметры надежности основного оборудования электростанций за жизненный цикл с фиксацией отклонений от предельно допустимых значений.

Фирменный контроль работы оборудования повысил не только ответственность фирм-изготовителей, но и уровень эксплуатации на объекте. Контроль по системе “двух глаз” взаимозависимых партнеров — это качественно другой уровень обеспечения параметров надежности. Такой же двойной контроль по системе “двух глаз” с передачей данных о стратегически важных объектах внедрились крупнейшие энергокомпании Европы (E.ON, RWE, EdF). Это радикально повысило компетентность за счет того, что все уровни управления, уполномо-

ченые принимать решения, обеспечиваются предаварийной информацией.

**Безусловно, никакая периодичность контроля параметров с помощью обходов персонала или регламентное (раз в году) измерение параметров переносными приборами (как это было определено для измерения вибрации на Саяно-Шушенской ГЭС) не заменят непрерывного контроля параметров безопасности в ситуациях, когда счет идет на секунды.**

Отношение между фирмами-изготовителями и собственниками оборудования в период его послепродажной эксплуатации наглядно демонстрирует мировой автопром. Это касается не только четких регламентов поддержания транспортных средств в работоспособном состоянии за счет организации развитой сети центров технического обслуживания, но и реакции фирм на дефекты в системах безопасности (тормозные системы, подача топлива, системы управления и т.д.).

Жесткие условия рынка заставляют транснациональные автогиганты постоянно сравнивать свои показатели не столько по экономичности и экологичности двигателей, сколько по надежности и безопасности водителя и пассажиров. Именно эти достижения в соотношении цена — качество в глазах покупателя дают им дополнительные, часто решающие преимущества в конкурентной борьбе. Ведущие компании “Toyota”, “General Motors”, “Ford” принимают немедленные меры по устранению проблем с безопасностью, обнаруженных программами тестовых проверок, и тем более выявленных при эксплуатации. Сегодня рынок не удивляет, когда сотни тысяч машин американские и японские компании отзывают в технические центры для замены деталей, обеспечивающих безопасность. Например, общее количество отозванных за последние несколько лет машин лидера мирового автопрома — компании “Toyota” составило гигантскую величину — 12 млн. штук! Это касается не только последних моделей, использующих новые конструктивные решения, но и машин, находящихся в эксплуатации более 7 лет. Именно **такая системная работа фирмы-изготовителя по обеспечению надежности и безопасности за жизненный цикл автомобиля, а не поиск виновного водителя в любой аварии обеспечивает доверие покупателей, о чем свидетельствуют годовые итоги продаж.**

**Слабые места в конструкции турбин, проекте СШГЭС и организации эксплуатации**

#### **Конструкция гидротурбин**

Основным обстоятельством, повлиявшим на последствия развития аварии, является то, что

единственный относительно быстродействующий защитный орган — направляющий аппарат турбины конструктивно имел подшипники, установленные в корпусе и крышке турбины, т.е. он защищал турбину от разгона, будучи встроенным в нее, как в конструкцию, которая очевидно считалась абсолютно надежной. **Это свидетельствует о некорректной аварии и о том, что в нормах на проектирование и проектирование аварийная ситуация с выбросом крышки турбины не просчитывалась.** В результате выброс крышки турбины исключил возможность воздействия любых защит на направляющий аппарат как единственный быстродействующий запорный орган, препятствующий поступлению воды в машзал.

**Вторым слабым местом** в общей системе защиты гидрогенератора является зависимость автоматического закрытия направляющего аппарата турбины от наличия электропитания регулятора частоты вращения. Исчезновение напряжения в принятой схеме электропитания регулятора скорости блокировало возможные импульсы на закрытие направляющего аппарата турбины для перекрытия подачи напорной воды в камеру рабочего колеса при выбросе крышки турбины в машинный зал.

**Третьим слабым местом** является отсутствие в регламентных документах на техническое обслуживание гидротурбины требования фирмы-изготовителя о дефектации во время ремонтов шпилек крышки корпуса турбины на наличие усталостных трещин. Основания для такого решения у фирмы-изготовителя конечно были. Во-первых, стандарты для изделий, работающих при температуре ниже 400° С такой проверки не требуют. Во-вторых, гидроагрегат, мощность которого за весь период эксплуатации была ограничена величиной в 640 МВт, был испытан с нагрузкой 740 МВт, при этом замечаний по крышке и шпилькам у фирм-изготовителей не было. Эти детали не были включены в перечень узлов, которые вынужденно ограничили нагрузку турбин СШГЭС величиной 640 МВт. В-третьих, послеаварийная проверка состояния металла шпилек на восьми турбинах, в том числе и на тех, которые отработали больше ГА № 2 по времени эксплуатации и имели большее количество переходов нереконструированной зоны работы, также показала отсутствие на них усталостных трещин. На шпильках ГА № 3 были обнаружены усталостные трещины, однако для этого есть причины. Во время проверки капитального ремонта в 2008 г. там были повреждения шпилек вследствие задевания при подъеме крышки турбины, из-за чего четверть шпилек была заменена. **В целом опыт эксплуатации Саяно-Шушенской ГЭС свидетельствует, что выбранный металл шпилек, его конструктивные размеры и заложенный высокий запас прочности (коэффициент запаса 4,5) для расчет-**



**ных усилий и принятой схемы затяжки шпилек оказались достаточными для надежной работы.**

Тем не менее произошедшая авария заставляет внести в такой вывод серьезное исключение. **Все это справедливо, если бы за время эксплуатации шпилек ГА № 2 не было периода воздействия на них больших нерасчетных циклических нагрузок, достаточных для образования первоначальных усталостных трещин.**

### **Проект гидроэлектростанции**

Предложенные меры в Акте комиссии Ростехнадзора и последующие решения проектного института показывают, что с позиций сегодняшнего дня некоторые первоначальные проектные решения кардинально изменены, так как они являлись факторами, усугубившими последствия аварии.

1. Недостаточная надежность электрических схем управления приводом аварийно-ремонтных затворов, которые при аварии после выброса крышки турбины и повреждения НА остались единственным защитным органом для прекращения поступления воды в машинный зал. В проекте не было автономного дизель-генератора для питания электропривода затвора в случае потери напряжения в системе собственных нужд СШГЭС, при одновременном погашении ОРУ-500 кВ. На центральном пункте управления не была предусмотрена установка ключей для дистанционного закрытия аварийных затворов.

2. Агрегатные и блочные щиты управления АСУ ТП находились на затопляемых отметках в потенциально затопляемом объеме машзала. В этой же зоне находилась аккумуляторная батарея в помещении, не имеющем водонепроницаемых стенок.

3. Ряд помещений для персонала СШГЭС находился на затопляемых отметках. Выход персонала с затопляемых отметок на отметку обслуживания машинного зала не был отделен водонепроницаемыми перегородками и плотными дверями от основного объема минусовых отметок и др.

### **Эксплуатация СШГЭС**

**Основным упущением** в эксплуатации является невыполнение Акта Государственной комиссии по приемке Саяно-Шушенской ГЭС в эксплуатацию (2000 г.) в части замены всех рабочих колес как мероприятия по повышению надежности работы гидротурбин. Это мероприятие было внесено в Акт по требованию бывшего директора СШГЭС В. И. Брызгалова из-за высокой гидродинамической нестабильности потока в преобладающей части рабочего диапазона нагрузок. Однако отсутствие заказа энергохолдинга РАО «ЕЭС России» не позволило за девятилетний период заменить ни одного рабочего колеса. Как показал опыт восстановления

СШГЭС, для полной замены рабочих колес достаточно трех лет. Это означает, что первые два гидроагрегата, которые подлежали очередной замене, имели бы ресурс работы меньше на 7 – 8 лет (около 50 тыс. ч) к моменту аварии 17 августа 2009 г. Необходимо отметить, что отказ от замены рабочих колес не был скомпенсирован энергохолдингом никакими дополнительными мерами по обеспечению надежности и безопасности эксплуатации гидротурбин со старыми рабочими колесами. Не провели ни усиления систем электроснабжения НА и АРЗ, ни включения в работу дополнительных защит, ни дополнительной диагностики или изменения схемы затяжки шпилек.

Нельзя объяснить отсутствие заказа и недостаток средств. После 2000 г. финансовое положение в стране было стабильно, что обеспечивало высокий уровень оплаты электроэнергии и безубыточность энергохолдинга.

Для столь явных упущений в эксплуатации на верхнем уровне управления в РАО «ЕЭС России» к 2000 г. были свои предпосылки. К этому времени в правлении энергохолдинга не было ни одного инженера-энергетика, имеющего успешный опыт руководства крупными энергокомпаниями. Поэтому при приоритете прибыли как основной цели компании естественным было ожидать девятилетнее саботирование энергохолдингом выполнения важнейшего мероприятия Акта Государственной комиссии (2000 г.) по замене рабочих колес на всех гидротурбинах.

**Однако с сегодняшних позиций именно это заблаговременно выполненное мероприятие реально предотвращало Саяно-Шушенскую катастрофу.**

Проведенные испытания турбин с новым рабочим колесом наглядно показали, что уровень вибрации и гидродинамические воздействия на узлы турбины стали значительно ниже, чем на старой конструкции. С учетом того, что замена рабочих колес производится со вскрытием турбины, выемкой ротора и детальной диагностикой металла, данная работа позволяла выявить также наличие усталостных трещин на шпильках гидроагрегата № 2, проработавших более 20 лет после наиболее тяжелых режимов 1982 – 1983 гг.

**Вторым негативным фактором**, исключившим возможность изменения нормативных требований по надежности в сторону ужесточения, являются ликвидация в 2000 г. в энергохолдинге РАО «ЕЭС России» Департамента научно-технической политики и прекращение финансирования работ по надежности оборудования, основу которых составляет прогнозирование реального ресурса работы ответственных узлов головных агрегатов.

Следует отметить, что финансовых предпосылок для таких радикальных, антиинновационных

решений не было. Именно с 2000 г. бюджет России был профицитен, экономика развивалась, платежеспособность всех групп потребителей позволяла стабильно оплачивать электроэнергию. В эти “тучные годы” энергохолдинг РАО “ЕЭС России” тратил миллиарды рублей на повышение своей зарплаты, бесконечные консалтинговые услуги и переоценки для выполняемой по его инициативе программы дезинтеграции электроэнергетики. Прекратилось даже выполнение такой конечной ежегодной работы по надежности, как “Обзор аварий и нарушений в работе электростанций и в сетях энергосистем”, а также выпуск противоаварийных и эксплуатационных циркуляров в электроэнергетике. **С учетом таких организационных структурных и финансовых решений фактически произошел полный демонтаж сложившейся системы управления надежностью в отрасли.** В наиболее тяжелом положении оказалось стареющее уникальное оборудование ГЭС, которое всегда изготавливается по индивидуальным проектам, не имея аналогового сравнения с другими электростанциями. **Этим самым была исключена возможность постоянного мониторинга надежности работы уникальных гидротурбин Саяно-Шушенской ГЭС, наработка которых приближалась к расчетному ресурсу.**

Учитывая суть обвинения Следственного комитета РФ, напомним историю появления защит от повышения вибрации. Раннее даже на высокооборотных паровых турбинах не предусматривалась защита от повышения вибрации из-за ее сложной работы. Однако значительный ущерб от аварий с разрушением паровых турбин был причиной внесения в 1980-е гг. изменений в директивные документы о необходимости включения защит по вибрации сначала в течение трех лет по мощным энергоблокам, а затем и по турбинам мощностью 100 МВт. Даже на тепловых электростанциях, где нет мощного гидродинамического воздействия на конструкцию подшипников, датчики вибрации работали ненадежно. Поэтому импульс на работу защит сначала формировался от двух датчиков из трех установленных. После повышения надежности работы датчиков импульс на защиту поступает от двух датчиков из двух установленных на смежных роторах. **Очевидно, что опыт внедрения защит от превышения вибрации мог быть использован, если были бы сохранены необходимые структурные подразделения по технической политике в энергохолдинге РАО “ЕЭС России”.**

Работа по совершенствованию противоаварийной нормативной базы успешно координировалась в Минэнерго СССР специальным главком — Техническим управлением по эксплуатации энергосистем. Исполнителями работы были отраслевые наладочные организации и отраслевые институты, ко-

торые имели годовые и пятилетние планы работы по надежности оборудования. При этом Минэнерго СССР неоднократно было межотраслевым координатором работ по надежности, разрабатывая и утверждая общие мероприятия для мощных энергоблоков совместно с Энергомашем, Электротехпромом и Приборостроением.

**Третьей возможностью избежать катастрофы** было бы наличие мощных сервисных фирм, оснащенных современными средствами диагностики и ремонта оборудования. Ранее эти функции выполняли специализированные предприятия Главэнергоремонта при Минэнерго СССР. Их общим инженерным центром было Центральное конструкторское бюро Главэнергоремонта с несколькими филиалами. Такие предприятия, как Мосэнергоремонт, Уралэнергоремонт, Сибэнергоремонт, с опытными и оснащенными инженерными службами имели высокий рейтинг не только в регионах России, но и за рубежом. Однако начиная с 2000 г. руководство РАО “ЕЭС России” взяло курс на отнесение специализированного технического обслуживания в электроэнергетике к непрофильному виду бизнеса и его ликвидацию. Такое алогичное решение можно сравнить, например, с ликвидацией специализированных институтов и клиник в системе здравоохранения. Повсеместное сокращение ремонтных объемов для предприятий Главэнергоремонта прежде всего сказалось на инженерных службах (лаборатории вибрации, регулирования, контроля металла и другие структуры измерения и диагностики). В это же время ремонт генерирующих мощностей электростанций был исключен из видов лицензируемой деятельности в электроэнергетике. **Столь полномасштабное разрушение на отраслевом уровне системы технического обслуживания оборудования, безусловно, способствовало снижению уровня диагностики, качества ремонта и препятствовало заблаговременному выявлению усталостных повреждений металла.**

#### **Причинно-следственные связи аварии**

Электроэнергетика, являясь технологически взаимосвязанным комплексом, относится к классическим управляемым системам. Такие системы не подлежат упрощенному, фрагментарному анализу, а исследуются комплексно с учетом всех функциональных и технологических связей.

Академик РАМН Д. С. Саркисов писал: **“Причиной болезни следует считать фактор, без которого она не может возникнуть”.** Этот принцип можно распространить на технические аварии в электроэнергетике.



Представляется логичной и обоснованной следующая причинно-следственная связь Саяно-Шушенской катастрофы:

**причиной отрыва крышки ГА № 2, послужившего началом аварии, являлось развитие усталостных трещин на шпильках турбин до размеров, приведших к превышению предела их прочности при восприятии циклических знакопеременных нагрузок гидродинамически нестабильного потока воды (ослабление сечения составило 66 %). Это фактически не исключало отрыв крышки в любое время при штатном переходе нереконструированной зоны работы, резком наборе нагрузки или нерасчетных режимах на гидрогенераторе;**

**причиной начального образования усталостных трещин на шпильках является эксплуатация ГА № 2 в период 1981 – 1983 гг. с временным рабочим колесом при подъеме уровня воды выше 100 м, когда гидродинамическая нестабильность потока достигла критического, не имеющего аналогов уровня.**

Об уровне высоких знакопеременных усилий, возникающих в этот период, свидетельствуют 30 внеплановых остановов оборудования и проведение 24 нетиповых восстановительных ремонтов подшипников и подцентровок вала турбины. При этом дважды происходил отрыв дополнительных жесткостей, приваренных по рекомендации фирмы-изготовителя для усиления конструкции корпуса подшипника турбины. При напоре около 150 м из-за дальнейшего увеличения гидравлической нестабильности потока, представляющего угрозу целостности конструкции, располагаемая мощность ГА № 2 впервые в гидроэнергетике была снижена сразу в 2,5 раза — от 400 до 150 МВт. В мае 1983 г. ГА № 2 был остановлен и пущен в эксплуатацию в 1986 г. только после установки постоянного рабочего колеса.

Наиболее вероятной причиной запредельно высокой гидродинамической нестабильности потока на ГА № 2 в период 1981 – 1983 гг. была беспрецедентная гидравлическая разбалансировка рабочего колеса. Она приводила к форсированному росту гидродинамической нестабильности и увеличению вибрации подшипников при увеличении напора воды и электрической нагрузки.

На ГА № 1, который в этот период, как и ГА № 2, находился в эксплуатации с таким же временным рабочим колесом диаметром 6100 мм, такой разбалансировки не наблюдалось. Уровень гидродинамической нестабильности на ГА № 1 был значительно ниже, что позволяло его надежно эксплуатировать с нагрузкой 400 МВт. Причина столь разного качества изготовления рабочих колес на одном заводе, по одной технической документации сегодня неактуальна, так как за это время изменились и

конструкция, и технология обработки, и система контроля точности изготовления.

## Выводы

Развитие усталостных трещин на шпильках является следствием последующей длительной эксплуатации гидроагрегата № 2 (более 20 лет) с высокой гидравлической нестабильностью потока в корпусе турбины в период прохождения нереконструированных режимов работы. Однако дефектация шпилек показала отсутствие усталостных трещин на остальных турбинах Саяно-Шушенской ГЭС даже при большем общем числе часов работы и большем количестве переходов нереконструированных зон работы. Это означает, что усилия, возникающие от гидравлической нестабильности потока, при установке проектных (постоянных) рабочих колес недостаточны и не могут быть причиной образования на шпильках начальных усталостных трещин.

**Опыт эксплуатации Саяно-Шушенской ГЭС до аварии и проведенный контроль металла шпилек крышек остальных турбин после аварии свидетельствуют, что эксплуатация всех гидроагрегатов (кроме ГА № 2) с проектными (штатными) рабочими колесами была безопасна.**

Гидроагрегат № 2 в 1981 – 1983 гг. работал с временным рабочим колесом меньшего диаметра (6100 мм), установленным в проектный корпус турбины с проектными шпильками крепления крышки. При повышении напора воды более 100 м гидродинамическая нестабильность потока воды, определяющая величину циклических знакопеременных усилий, достигла предельного значения, вызвавшего соответственно нерасчетные знакопеременные нагрузки на конструкцию турбины. В этот период из-за значительных силовых воздействий на конструкцию турбины было 30 внеплановых остановов ГА № 2, после которых проведено 24 ремонта по устранению дефектов на подшипниках, восстановлению центровки валопровода, установке дополнительных сварных ребер жесткостей на корпусе подшипника турбины и т.п. **Из-за низкой надежности ГА № 2 в 1983 г. его мощность сначала была снижена с 400 до 150 МВт (!), а затем ГА № 2 был остановлен и включен в работу только после установки постоянного рабочего колеса в 1986 г. Наличие столь экстремального периода работы, когда уровень гидродинамических воздействий от потока воды на ГА № 2 не компенсировался конструктивными запасами прочности, многократно снижая ресурс работы его основных узлов, не имеет аналогов в истории гидроэнергетики.** Это дает основание считать, что именно в этот период образовались начальные стадии уста-

лостных трещин на шпильках ГА № 2, приведшие при их развитии к аварии 17 августа 2009 г.

### Неизбежность аварии 17 августа 2009 г.

За почти тридцатилетнюю историю Саяно-Шушенской ГЭС было проведено более 50 капитальных, а также сотни текущих и внеплановых ремонтов. В абсолютном большинстве на них выполнялись и работы по проверке факторов, влияющих на вибрацию, и конкретные мероприятия по ее устранению. Однако существующие регламенты капитальных ремонтов, отраслевые стандарты и рекомендации фирмы-изготовителя не предусматривают дефектации шпилек на наличие усталостных трещин.

Основными работами по снижению вибрации являются:

проверка и исправление центровки подшипника и вертикальности вала;

проверка целостности вкладыша подшипника или его замена;

устранение кавитационного износа, балансировка и др.

В случае 17 августа 2009 г., вероятней всего, кроме перечисленных работ была бы дополнительно обнаружена дефектность датчика вибрации, так как его показания на остановленной турбине уже 16 августа имели явно завышенное значение (80 мкм). Очевидно, что после устранения выявленных недостатков было бы принято решение о пуске турбины № 2. Это значит, что снова появились бы переходы через не рекомендованные зоны работы и продолжилась дальнейшая эксплуатация ГА № 2 под управлением автоматической системы регулирования активной мощности (ГРАМ). Как "бережно" относится система ГРАМ к гидротурбинам СШГЭС хорошо показано в Акте комиссии Ростехнадзора. **Это позволяет сделать вывод, что предупредить аварию на ГА № 2 за счет останова за несколько часов (минут) до аварии для устранения вибрации было невозможно. Авария на ГА № 2, где был исчерпан предел усталостной прочности шпилек из-за развившихся усталостных трещин, была неизбежна.**

Ее последствия и конкретный момент аварии зависели от многих факторов:

количества персонала на минусовых отметках машинного зала;

наличия на рабочих местах руководителей гидроэлектростанции;

возможности оперативного привлечения ремонтных бригад для локализации аварии;

состава работающего оборудования и др.

Сочетание факторов зависит от случайностей и не поддается научному прогнозу.

### Заключение

В конечном итоге решение о виновности конкретных лиц в Саяно-Шушенской катастрофе будет принимать суд, очевидно, на основании анализа всех причинно-следственных факторов аварии с максимальным использованием экспертных заключений.

Свое заключение я как эксперт представил в Следственный комитет РФ 15 июня 2011 г. Данная работа является дополнительной экспертизой технологической части аварии в связи с окончанием расследования уголовного дела и признанием виновным бывшее руководство Саяно-Шушенской ГЭС в непринятии мер по останову гидроагрегата № 2 для устранения его повышенной вибрации.

**Представляется, что основным экспертным заключением по оценке вибрационного состояния гидроагрегата № 2 является работа специалистов Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ), имеющего наибольший опыт исследования вибрации на турбинах отечественного машиностроения.** Однако по каким-то причинам данное заключение не учтено в окончательных выводах. Очевидно, необходимо в кратчайшие сроки провести независимую расширенную экспертизу материалов ЦКТИ с учетом последних данных эксплуатации. Если данных в отчете ЦКТИ недостаточно, то нужна новая независимая экспертиза по оценке вибрационного состояния ГА № 2 перед аварией, а также заключение о работоспособности датчика вибрации на подшипнике турбины и о возможности предотвращения персоналом аварии, ориентируясь на показатели эксплуатационных приборов.

Дополнительная экспертиза вибрационного состояния ГА № 2 до аварии и оценка возможности предотвращения аварии путем вывода ГА № 2 из работы должны быть проведены в первую очередь.

Представляется также, что для обоснования причин Саяно-Шушенской аварии чрезвычайно важно иметь экспертное заключение о времени образования и периодах развития усталостных трещин на шпильках крепления крышки турбины № 2. Это может снять ряд проблем, которые сегодня без обоснований отнесены на последний период эксплуатации гидроагрегата № 2, после завершения в марте 2009 г. его планового ремонта.

# Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока

Коваленко В. В., доктор техн. наук,

Гайдукова Е. В., Соловьев Ф. Л., кандидаты техн. наук,

Голованова Е. Ю., аспирант

(Российский государственный гидрометеорологический университет)

Предложена методика, обеспечивающая получение устойчивых оценок проектных расходов. Она предусматривает расширение фазового пространства, в рамках которого выполняются гидрологические расчеты обеспеченных расходов воды, закладываемые в проектную документацию на строительство гидротехнических сооружений.

**Ключевые слова:** гидрологическое обоснование строительных объектов, многолетний речной сток, расходы воды, степень неустойчивости, критерий устойчивости, гидрологическая надежность гидротехнических сооружений, методология частично инфинитивного моделирования, сравнительная оценка обеспеченных расходов воды.

Гидротехническая надежность проектируемых и существующих гидротехнических сооружений в рамках нормативных документов [1] основывается на следующих предположениях:

1) многолетний гидрологический режим статистически не меняется: значение расхода  $QP\%$  заданной обеспеченности  $P\%$ , полученное за прошедшее до момента разработки проекта время, останется таким же в будущем;

2) процесс формирования стока в рамках общепринятых в инженерной гидрологии аналитических аппроксимаций эмпирических кривых обеспеченности кривыми из класса распределений К. Пирсона происходит устойчиво по всем используемым начальным моментам, а значит, и расчетным гидрологическим характеристикам (норма, коэффициенты вариации и асимметрии). (Мы имеем в виду не неустойчивость эмпирических оценок моментов из-за ограниченности рядов наблюдений, а физическую (генетическую) неустойчивость формирования вероятностного режима.)

Первое предположение (“мир застыл”, пусть даже в статистическом смысле) есть вынужденная идеализация, необходимость которой связана с использованием при обработке фактических рядов наблюдений стандартных методов статистики. Однако эти методы не позволяют учитывать непосредственно факторы формирования стока — изменение климата и характеристики подстилающей поверхности водосборов — для прогнозирования эволюционных изменений плотности вероятности стока. Тем не менее, это предположение в настоящее время можно снять и давать оценки обеспеченных проектных расходов с учетом климатических сценариев [2]. Второе предположение более десяти лет назад было поставлено под сомнение [3, 4], предпринимались шаги по разработке возможных подходов к его устранению (например [5]).

Цель данной статьи — разработка методики устойчивой оценки расходов воды в зонах неустойчивого формирования многолетнего стока.

Модель формирования многолетнего речного стока и ее применение для выявления регионов с неустойчивыми моментами вероятностных распределений. Базовой моделью, используемой в статье, является уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК)

$$\frac{\partial p(Q, t)}{\partial t} = -\frac{\partial(A(Q, t)p(Q, t))}{\partial Q} + 0.5 \frac{\partial^2(B(Q, t)p(Q, t))}{\partial Q^2}, \quad (1)$$

где  $p$  — плотность вероятности;  $A$  и  $B$  — коэффициенты сноса и диффузии, определяющие скорость изменения математического ожидания приращений расходов и их квадратов;  $t$  — время.

Уравнение (1) является базовым для сектора гидрорасчетов, занимающегося статистическими оценками многолетнего речного стока, так как инженерная гидрология основана на уравнении К. Пирсона

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p, \quad (2)$$

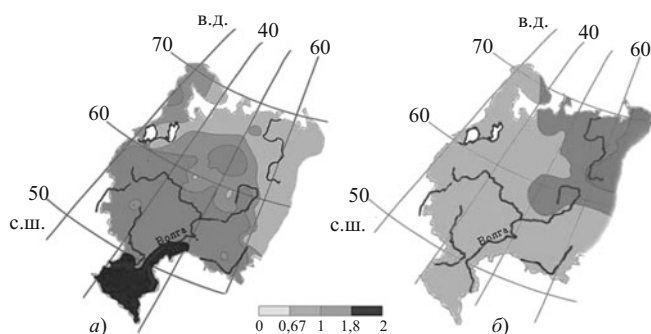


Рис. 1. Распределение зон неустойчивости по стоку (а) и по испарению (б)

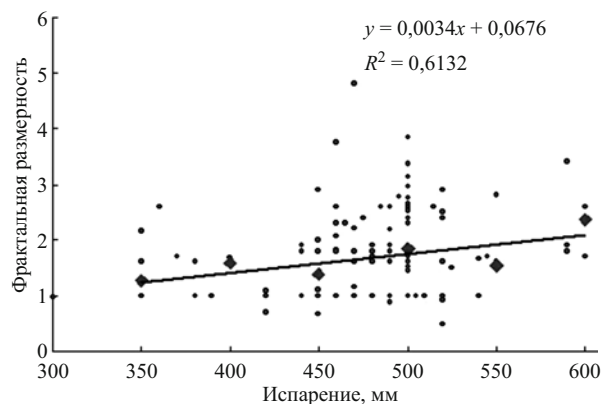


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от испарения (жирными точками показаны осредненные значения по градациям фрактальной размерности и испарения):  $y$  — фрактальная размерность;  $x$  — испарение;  $R^2$  — коэффициент детерминации

где  $a, b_0, b_1, b_2$  — коэффициенты. Оно является частным случаем (стационарные случайные процессы) уравнения (1).

На практике ограничиваются несколькими начальными моментами, поэтому аппроксимируем модель ФПК (1) системой дифференциальных уравнений для начальных моментов  $m_n$  ( $n$  — порядок момента). В теории случайных процессов подобная процедура известна и в нашем случае приводит к следующей системе:

$$\left. \begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}}) m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}}) m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}}) m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}}) m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$ ;  $\bar{N} = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$  ( $\bar{c}$  и  $\bar{N}$  — математические ожидания;  $\tilde{c}$  и  $\tilde{N}$  — белые шумы с интенсивностями  $G_{\tilde{c}}$ ,  $G_{\tilde{N}}$  и взаимной интенсивностью  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ );  $k$  — коэффициент стока;  $\dot{X}$  — норма осадков;  $\tau$  — время релаксации бассейна.

Из системы (3) следует [3], что при  $\bar{c} < 0,5nG_{\tilde{c}}$  производная  $dm_n/dt > 0$ , т.е.  $m_n \rightarrow \infty$ . Это и есть формальный признак неустойчивости. Если обозначить  $\beta = G_{\tilde{c}}/\bar{c}$ , то неустойчивость для момента  $n$ -го порядка  $m_n$  возникает при  $\beta > 2/n$  ( $m_3$ :  $\beta > 2/3$ ,  $m_2$ :  $\beta > 1$ ,  $m_1$ :  $\beta > 2$ ). Чем старше момент, тем меньшая относительная интенсивность шума  $G_{\tilde{c}}$  требуется для его неустойчивости. Неустойчивость — индикатор того, что бассейны, в которых она имеет место, формируют сток по более сложной схеме, чем это следует из уравнения Пирсона. Например, распределения плотности вероятности двумодальны или имеют “толстый хвост”. В последнем случае модель перестает контролировать (статистически предсказывать) появление значительных расходов воды (выбросов). Формально это означает, что при  $G_{\tilde{c}} \approx \bar{c}$  мультипликативная составляющая шумов в системе (3) стремится к нулю и при прогнозах для определения прогнозных моментов  $m_n^{np}$  производится деление на нуль (а на нуль делить нельзя).

Для практического вычисления параметра  $\beta$ , являющегося, по существу, критерием устойчивости, получена формула [3, 5]

$$\beta = 2k \ln r + 2, \quad (4)$$

где  $k, r$  — коэффициенты стока и автокорреляции (при годовой сдвигке) соответственно.

Для определения коэффициента стока  $k$  можно воспользоваться существующими картами его распределения по территории, а коэффициент автокорреляции  $r$  можно определить по таблице [6, табл. 2.9]. Авторы данной статьи воспользовались фактическими рядами наблюдений за стоком и осадками на ЕТР для вычисления  $k, r$  и картирования значений  $\beta$  (рис. 1, а). Из представленной карты видно, что степень неустойчивости возрастает к югу ЕТР. Следует заметить, что при использовании формулы (4) не получить зна-



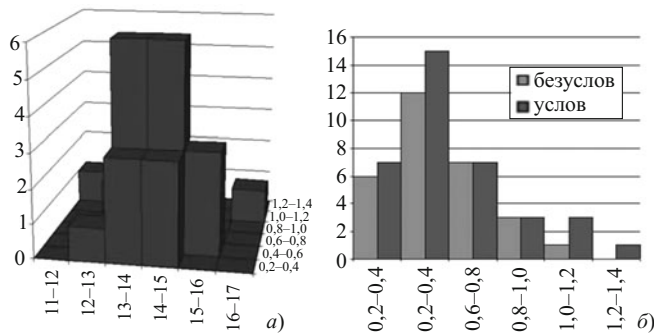


Рис. 3. Двумерная (а) и одномерная (б) гистограммы (р. Тихая Сосна — г. Алексеевка)

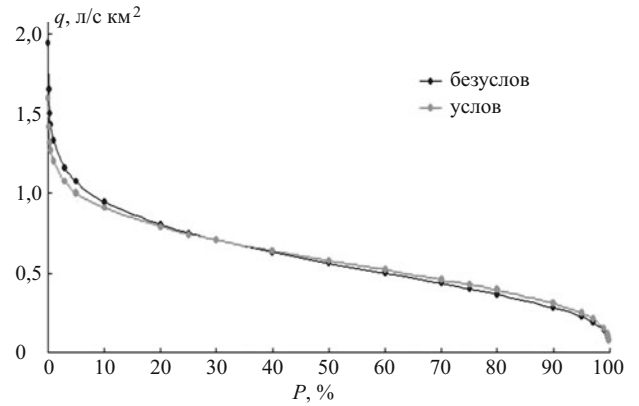


Рис. 4. Пример условной и безусловной кривой обеспеченности (р. Тихая Сосна — г. Алексеевка)

чений  $\beta > 2$ , так как в любой ситуации  $r < 1$ ,  $k < 1$ . Однако существуют значительные территории, в которых многолетний сток формируется неустойчиво по третьему, а часто и по второму моменту. В этих регионах расчетные характеристики, полученные в рамках действующего свода правил [1], могут оказаться ненадежными и приводить к более частым авариям, чем это должно следовать из значения проектной обеспеченности.

Т а б л и ц а 1

Влияние широты местности на численные значения критериев устойчивости

Градус северной широты	Река — створ	Период наблюдений, гг.	$\beta_Q$	$\beta_E$
44,22	Кума — ст-ца Александрийская	1931 – 1980	1,93	0,00
48,00	Кундрючья — ст-ца Владимирская	1953 – 1980	1,78	0,01
50,63	Оскол — г. Старый Оскол	1938 – 1980	1,49	0,06
51,45	Большой Караман — пгт. Советское	1919 – 1980	1,85	0,02
52,67	Чагра — с. Новотулка	1921 – 1980	1,78	0,01
53,68	Кондурча — п. Украинка	1936 – 1980	1,59	0,33
54,22	Кондурча — с. Кошки	1927 – 1980	1,44	0,36
55,78	Летка — с. Казань	1916 – 1980	1,24	0,31
56,65	Уфа — г. Краснофимск	1915 – 1980	1,20	0,04
57,48	Полисть — д. Подтополье	1938 – 1980	1,16	0,35
58,02	Нея — д. Буслаево	1922 – 1980	0,90	0,29
59,50	Воложба — д. Воложба	1927 – 1980	1,35	0,35
60,57	Юг — д. Гаврино	1927 – 1980	0,90	0,30
61,72	Вычегда — г. Сыктывкар	1921 – 1980	1,29	0,61
62,23	Яренга — с. Тохта	1935 – 1980	1,46	0,64
64,72	Пинега — с. Кулогоры	1918 – 1980	0,34	0,61
65,82	Пеза — д. Игумново	1924 – 1980	0,25	0,87



Возможные пути обеспечения гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивости. Для преодоления возникшей проблемы в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) разработана методология частично инфинитного моделирования, суть которой заключается в следующем. Неустойчивость рассматривается как атрибут процесса развития, а так как развитие системы означает появление (зарождение) у нее новых свойств (фазовых переменных), то включение в модель формирования стока новых переменных (наряду с расходом воды) уменьшает мультипликативный шум за счет частичного перераспределения внешнего воздействия на внутреннюю реакцию бассейна. Вместо одномерного уравнения ФПК применяется  $n$ -мерное

Т а б л и ц а 2

**Отклонения годовых расходов малой обеспеченности, вычисленные по условным и безусловным кривым распределения Крицкого — Менкеля**

Река — пункт	$C_v$	$C_s$	Обеспеченность, %			
			0,01	0,1	1	10
			Относительное отклонение ординаты кривых обеспеченности: ((безусл. — усл.)/безусл.)100 %			
Зона устойчивого формирования стока						
Р. Пеза — д. Игумново	0,16	0,26	– 3,5	– 2,8	– 2,0	– 0,9
Р. Унжа — г. Кологрив	0,30	1,42	5,8	– 1,7	– 8,0	– 11,7
Р. Белая — д. Сыртланово	0,36	0,84	11,3	7,6	3,7	– 0,1
Р. Печора — д. Якша	0,16	0,45	–	–	–	–
Р. Паша — с. Часовенское	0,23	0,12	– 6,8	– 4,6	– 1,6	1,0
Р. Сясь — д. Яхново	0,25	0,17	– 0,8	– 0,7	– 0,5	0,1
Р. Мста — д. Девкино	0,27	0,54	–	–	–	–
Р. Луга — ст. Толмачево	0,28	0,05	–	–	–	–
Р. Сороть — д. Осинкино	0,32	0,32	– 5,9	– 5,8	– 5,4	– 4,6
Среднее значение			0,02	– 1,3	– 2,3	– 2,7
Зона неустойчивого формирования стока						
Р. Юг — пгт. Подосиновец	0,30	1,39	18,0	17,9	17,4	15,9
Р. Тихая Сосна — г. Алексеевка	0,44	0,76	28,6	23,6	17,9	10,8
Р. Синюха — с. Синюхин Брод	0,48	0,59	11,9	7,9	3,4	– 1,6
Р. Свяга — с. Ивашевка	0,44	0,38	– 10,7	– 7,9	– 4,6	– 0,1
Р. Самара — с. Елшанка	0,48	1,28	47,0	36,5	25,4	12,7
Р. Цна — г. Княжево	0,34	0,71	11,9	9,9	7,3	2,7
Р. Случь — с. Сарны	0,52	1,04	60,3	46,9	32,8	16,3
Р. Десна — с. Разлеты	0,24	0,50	– 5,7	– 4,4	– 2,8	– 0,8
Р. Псел — с. Запселье	0,37	0,35	13,8	13,3	12,4	10,9
Р. Днепр — г. Смоленск	0,27	1,18	– 3,5	– 2,2	– 1,0	0,4
Р. Сейм — с. Лебяжье	0,33	0,14	–	–	–	–
Среднее значение			17,2	14,2	10,8	6,7

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial(A_i p)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2(B_{ij} p)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \quad (5)$$

где  $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$  — вектор состояния.

Методами фрактальной диагностики [7, 8, 9] установлено, что на ЕТР размерность пространства вложения, т.е. значение  $n$  в уравнении (5), меняется в основном в пределах 1 – 3. При этом установлена статистически значимая зависимость фрактальной размерности от испарения (и приземной температуры воздуха, рис. 2). (Влияния на нее свойств подстилающей поверхности водосборов не обнаружено)

Остается найти пути перехода от традиционно используемых в гидрологии распределений  $p(Q)$  к распределениям  $p(Q, E)$  и на основе последних выявить возможности по повышению устойчивости оценок малообеспеченных расходов воды. Для этого был выполнен обширный круг исследований [5], в результате которых:

разработана методика генерирования многолетних рядов испарения (в ее основе лежит разработка А. Р. Константинова [10]), которая использована для пунктов метеонаблюдений за влажностью и температурой приземного воздуха на ЕТР;

по сгенерированным рядам испарения оценены начальные моменты (нормы,  $C_v$  и  $C_s$ ), коэффициенты испарения  $k_E$  и автокорреляции, необходимые для построения эмпирических распределений  $p(E)$  и оценки критерия устойчивости  $\beta_E$  решений системы уравнений, аналогичной системе (3) (но для испарения);

Построена карта распределения  $\beta_E$  для ЕТР (рис. 1, б).

Из рис. 1, видно, что имеет место относительная “зеркальность” зон неустойчивости. Это подтверждает табл. 1: чем больше  $\beta_Q$ , тем меньше  $\beta_E$ .

Устойчивость моментов в расширенной (за счет включения в уравнение испарения) модели ФПК (5) ( $Y_1 = Q, Y_2 = E, n = 2$ ) будет в случае

$$\operatorname{div} \vec{A} = \sum \partial A_i / \partial Q_i = -(\bar{c}_Q - 0,5G_{\bar{c}_Q}) - (\bar{c}_E - 0,5G_{\bar{c}_E}) < 0, \quad (6)$$

где  $\bar{c}_E$  и  $G_{\bar{c}_E}$  математическое ожидание и интенсивность шума мультипликативной составляющей модели испарения.

Из выражения (6) следует, что учет дополнительной фазовой переменной в виде испарения увеличивает шансы на сжимаемость. Это наглядно видно, если переписать (6) в виде (с учетом того, что  $\beta = G_{\bar{c}}/\bar{c}$ ):

$$\operatorname{div} \vec{A} = -\bar{c}_Q(1 - 0,5\beta_Q) - \bar{c}_E(1 - 0,5\beta_E). \quad (7)$$

Как видно из рис. 1, табл. 1 и формулы (7), каждая из переменных ( $Q$  и  $E$ ) уравнения (5) стабилизирует другую (тем больше, чем неустойчивее последняя).

*Примеры расчетов.* Ниже приводится сравнительная оценка обеспеченных расходов воды, вычисленных по различным вариантам кривых обеспеченности и моделям в зонах устойчивого и неустойчивого формирования стока. Методика заключается в следующем. По имеющимся совместным рядам расхода и испарения строится эмпирическая двумерная гистограмма (рис. 3, а). Если ориентироваться на безусловное распределение  $p(Q)$  (рис. 3, б, темные столбцы), то его хвост почти всегда более пологий (поднят) по сравнению с условным распределением  $p(Q/E = \bar{E})$ , построенным только по точкам, расположенным в интервале  $\Delta E$ , обрамляющим центр  $E$  распределения (минимальное число интервалов равно трем). Это приводит к тому, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей хвост условного распределения быстрее приближается к оси расходов (табл. 2, рис. 4).

Конечно, погрешность определения нормы,  $C_v$  и  $C_s$  по условной кривой больше, чем по безусловной (из-за неизбежного уменьшения числа точек, попадающих в центральный интервал  $\Delta E$  и группирующихся вокруг  $\bar{E}$ ). Например, при  $C_v = 0,3$  и уменьшении объема выборки в два раза погрешность определения  $C_v$  увеличивается с 9,5 до 13,5 %, т.е. на 30 %. Однако применение условных распределений открывает возможность корректного прогнозирования в зонах с неустойчивым формированием стока. Природу этой корректности можно пояснить на примере уравнения для первого момента из системы (3). Для равновесного климатического сценария можно принять, что  $dm_1^{\text{пр}}/dt = 0$ . Тогда

$$m_1^{\text{np}} = (-0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}) / (\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}}).$$

Если  $\beta = G_{\tilde{c}}/\bar{c} \rightarrow 2$ , то надо делить на величину, близкую к нулю. Если мы находимся в неустойчивых южных регионах ЕТР, где  $k = 0,05$ , то  $\bar{c} = 20$ , а  $G_{\tilde{c}}$  близка к 40. Даже если  $\beta$  далек от двух, то все равно из-за неизбежных погрешностей при параметризации мы имеем малую разность двух неточных величин. Это делает расчеты очень неточными (для старших моментов ситуация только усугубляется). Если же мы перейдем к параметризации и прогнозу с использованием условных распределений и в качестве внешнего воздействия возьмем не просто  $\bar{N} = \bar{X}$  (при  $\tau = 1$ ), а  $\bar{N} = \bar{X} - \bar{E}$ , то  $\bar{c} \rightarrow 1$  и шуметь практически нечему ( $G_{\tilde{c}} \rightarrow 0$ ,  $\beta \rightarrow 0$ ).

## Выводы

1. На территории Российской Федерации существуют значительные по своим размерам регионы (в основном это южные районы), в которых многолетний речной сток формируется статистически неустойчиво (по второму и третьему начальным моментам) в рамках общепринятой в практике гидрологического обоснования строительных проектов модели, приводящей к распределениям вероятности из семейства распределений К. Пирсона.

2. Предложена методика, обеспечивающая получение устойчивых оценок проектных расходов. Она предусматривает расширение фазового пространства, в рамках которого выполняются гидрологические расчеты обеспеченных расходов воды, закладываемые в проектную документацию на строительство гидротехнических сооружений. Практически это означает переход от одномерных вероятностных распределений к двумерным, в которых наряду с расходом воды используется испарение. Для последнего предложена методика генерирования многолетних рядов по стандартным метеорологическим наблюдениям, производимым на государственной сети постов.

3. Выполненные расчеты с использованием условных распределений, получаемых из двумерных, показали, что учитывать вторую фазовую переменную имеет смысл в регионах с неустойчивым формированием стока (для ЕТР это речные бассейны, расположенные южнее  $55^\circ$  с. ш.). В среднем различия между оценками обеспеченных расходов, получаемых по рекомендациям [1] и предлагаемой методике, меняются от 6,7 % при обеспеченности 10 % до 17,2 % при обеспеченности 0,01 %, причем в 90 % случаев оценки расходов по условным распределениям меньше, чем по безусловным. В регионах с устойчивым формированием стока (это зоны достаточного и избыточного увлажнения) указанные выше различия не превосходят 2,7 % для обеспеченностей от 10 до 0,01 %, причем они уменьшаются в сторону малых обеспеченностей.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты № 2.1.1/9596, № П740).

## Список литературы

1. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик / Госстрой России. — М.: ФГУП ЦПП, 2004.
2. Коваленко В. В. Оценка гидрологической надежности гидротехнических сооружений при неустановившемся климате // Гидротехническое строительство. № 4. 2010.
3. Коваленко В. В., Хаустов В. А. Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование зон ожидаемых аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата // Метеорология и гидрология. 1998. № 12.
4. Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Чистяков Д. В., Хамлили А. Прогностические модели развития процессов катастрофического формирования многолетнего годового речного стока // Метеорология и гидрология. 2010. № 10.
5. Коваленко В. В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. — СПб.: РГГМУ, 2009.
6. Пространственно-временные колебания стока рек СССР / Под ред. А. В. Рождественского. — Л.: Гидрометеиздат, 1998.
7. Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Куасси А. Г. Фрактальная диагностика речного стока для устойчивого описания многолетних колебаний гидрологических характеристик // Метеорология и гидрология. 2008. № 4.
8. Урицкий В. М., Музалевская Н. П. Фрактальные структуры и процессы в биологии (обзор) // Биомедицинская информация и этиология. — СПб.: СПИИРАН, 1995.
9. Божжюкин С. В., Паршин Д. А. Фракталы и мультифракталы. — СПб.: СПГТУ, 2000.
10. Константинов А. Р. Испарение в природе. — Л.: Гидрометеиздат, 1968.

**Рецензия на статью В. В. Коваленко, Е. В. Гайдуковой,  
Ф. Л. Соловьева и Е. Ю. Головановой  
“Обеспечение гидрологической надежности  
гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого  
формирования многолетнего речного стока”**

Авторы рецензируемой статьи сомневаются в том, что “процесс формирования стока ... происходит устойчиво по всем используемым начальным моментам, а значит, и расчетным гидрологическим характеристикам (норма, коэффициенты вариации и асимметрии)”, и ставят задачу разработать методику “устойчивой оценки расходов воды в зонах неустойчивого формирования многолетнего стока”, т.е. стока регионов, где сток характеризуется “неустойчивыми моментами вероятностных распределений”.

В качестве критерия устойчивости предложено отношение интенсивности белого шума  $G_{\tilde{c}}$  к белому шуму  $\tilde{c}$ :  $\beta = G_{\tilde{c}}/\tilde{c}$ , а для вычисления этого параметра — формула  $\beta = 2k \ln r = 2$ , где  $k$  — коэффициент стока;  $r$  — коэффициент корреляции между стоком смежных лет.

Считая, что неустойчивость распределений вероятности стока можно понизить путем перехода от одномерного уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова к  $n$ -мерному, авторы статьи включают в анализ испарение  $E$  и намечают в дальнейшем найти переход от традиционно используемых распределений  $p(Q)$  к двумерным  $p(Q, E)$ , которые, по их мнению, повысят устойчивость “оценок малообеспеченных расходов воды”.

Приведены результаты вычисления критериев вероятностной устойчивости годового стока  $\beta_Q$  и испарения  $\beta_E$  семнадцати рек, расположенных в пределах от 44 до 65° северной широты. Из этого сопоставления следует, что критерий стока  $\beta_Q$  уменьшается от 1,93 до 0,25 по мере увеличения широты, а критерий  $\beta_E$  растет от 0,0 до 0,87.

Отклонения расходов малой обеспеченности, вычисленных по кривым распределения  $p(Q)$  и двумерным распределениям  $p(Q/E = \bar{E})$ , иллюстрированы на примере девяти рек зоны устойчивого формирования стока и одиннадцати рек зоны неустойчивого формирования.

#### **Замечания по статье**

1. Непонятен смысл фразы, что уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова “является базовым для сектора гидрорасчетов (что за зверь? — Вопрос рец.), занимающегося статистическими оценками многолетнего речного стока ...” (годового, максимального или минимального? — Вопрос рец.).

2. В таблицах, численно иллюстрирующих результаты выполненных процедур, отсутствуют необходимые сведения о периодах наблюдений за стоком и испарением (табл. 1), а к табл. 2, кроме того, нужны данные о выборочных (и принятых) значениях  $C_v$  и  $C_s$ .

3. Не ясно, о каком стоке (расходах воды) идет речь — среднем годовом или максимальном, и, в таком случае, какие результаты расчетов приведены в табл. 2. По-видимому, это годовое значение стока, потому что влияние испарения на максимальные расходы воды еще бессмысленнее, чем всё остальное. Если это так, то квантили малой вероятности превышения годового стока в проектных расчетах никем никогда не рассматриваются и к вопросам гидротехнической надежности ГТС не относятся.

4. Абсолютно не обоснованы выводы авторов о том, что разброс значений квантиля 0,01 % в “неустойчивой” зоне составляет 17 %, а в “устойчивой” — 2,7 %. Указанные значения осредняют величины от 11,3 до –5,9 % (первая зона) и от 60,3 до –10,7 % (вторая зона).

5. Вывод о том, что “предложена методика, обеспечивающая получение устойчивых оценок проектных расходов”, свидетельствует о непонимании авторами проектных задач инженерной гидрологии и о переоценке собственных “научных” достижений.

Асарин А. Е., доктор техн. наук, Жиркевич А. Н.



## Комментарии к рецензии на статью “Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока”

Рецензенты делают следующие замечания:

1. Рецензентам непонятен смысл фразы, что уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова “является базовым для сектора гидрорасчетов (что за зверь? — Вопрос рец.), занимающегося статистическими оценками многолетнего стока” (годового, максимального или минимального? — Вопрос рец.).

**Комментарий.** В каком именно смысле уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова является базовым для статистических гидрорасчетов указано в самой статье (первый абзац снизу). В частном, статистически стационарном случае оно переходит в уравнение Пирсона, решениями которого (аналитическими зависимостями) аппроксимируется эмпирическое поле точек, полученных с помощью фактических рядов наблюдений. При этом уравнение Пирсона в гидрологии до недавнего времени рассматривалось как “лекало” к этому полн, а его коэффициенты носили “подгоночный характер” и не связывались с физикой формирования стока (точнее, с физикой формирования кривой обеспеченности). Это продолжалось многие десятилетия, продолжается и сейчас (см. стр. 4 – 5 пункт 5.3 СП 33-101-2003, в котором перечисляются типы кривых распределений для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения — все они из класса распределений К. Пирсона или их частные случаи с фиксированной левой границей). Если уравнение Пирсона вывести из уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК) (это сделал акад. А. Н. Колмогоров), то уравнение Пирсона из мертвого “лекало” превращается, по существу, в генетическую модель формирования кривых обеспеченности (точнее, кривых плотности вероятности). Именно поэтому можно утверждать (с полным основанием), что уравнение ФПК является базовым для статистической гидрологии.

Что касается вопроса рецензентов о “звере”, то согласно раздела 3 “Термины и определения” СП 33-101-2003 гидрорасчетами называется “раздел инженерной гидрологии, в задачи которого входит разработка методов, позволяющих рассчитывать значения различных характеристик гидрологического режима” (стр. 1). Ясно, что под это определение попадают не только статистические методы расчетов, но и любые другие, например гидравлические. Поэтому уравнение ФПК является базовым для того сектора гидрорасчетов, который занимает-

ся только статистическими оценками многолетнего стока.

2. В таблицах, численно иллюстрирующих результаты выполненных процедур, отсутствуют необходимые сведения о периодах наблюдений за стоком и испарением (табл. 1), а к табл. 2, кроме того, нужны данные о выборочных (и принятых) значениях  $C_v$  и  $C_s$ .

**Комментарий.** Что касается наблюдений за испарением, то они на гидрометеорологической сети не производятся и ряды испарений генерировались по методике А. Р. Константинова на основе наблюдений за влажностью и температурой приземного воздуха (об этом сообщается в тексте статьи). Данные о периодах наблюдений за ними и стоком, использованных при расчетах, а также о значениях  $C_v$  и  $C_s$  приведены в табл. 1 и 2, дополненных соответствующими столбцами (хотя эта информация мало что добавляет к сути самой методологии, излагаемой в статье).

3. Не ясно, о каком стоке (расходах воды) идет речь, среднем годовом или максимальном, и в таком случае, какие результаты расчетов приведены в табл. 2. По-видимому, это годовое стока, потому что влияние испарения на максимальные расходы воды бессмысленно. А если это так, то квантили малой вероятности превышения годового стока в проектных расчетах никогда никем не рассматриваются и к вопросам гидротехнической надежности ГТС не относятся.

**Комментарий.** В статье методология рассматривается на примере годового стока. На это указывает, в частности, ссылка на табл. 2.9 (стр. 101) монографии под ред. А. В. Рождественского [6], в которой приводятся коэффициенты автокорреляции многолетнего годового стока. Чтобы яснее отразить это обстоятельство, можно дополнить название табл. 2 и дать его в следующей редакции “Отклонения годовых расходов малой обеспеченности по условным и безусловным кривым распределения Крицкого — Менкеля”.

О максимальном стоке пока речи нет, но его исследование стоит на повестке дня. Поэтому утверждение рецензента о бессмысленности влияния испарения на максимальный сток не относится к содержанию статьи, хотя надо заметить, что есть максимальный сток дождевого происхождения (срочный или даже мгновенный), и тогда его значения формируют в основном гидрогеологические условия (насыщенность почвогрунтов влагой), но

есть и максимальный слой весеннего половодья (он является преобладающим на половине территории России), формирующийся длительное время, на протяжении которого испарение соизмеримо с речным стоком.

Бессмысленным выглядит утверждение рецензента о “бессмысленности всего остального”. Чего именно? Видимо, явного включения испарения в получение оценок годового стока. А как же его не включать, если в многолетнем водном балансе речных бассейнов 62 % составляет испарение, т.е. чуть ли не в 2 раза больше стока, — средний по территории бывшего СССР коэффициент стока составляет 0,3 (см. Г. П. Калинин. Проблемы глобальной гидрологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. Табл. 40, стр. 312), а для суши Земли в целом — 0,29 (см. там же, табл. 1, стр. 13). Как в таком случае игнорировать влияние вариаций большей величины (испарения) на меньшую (сток), особенно в южных регионах? Приведенная в статье карта зон неустойчивости научно обоснованно подтвердила очевидный факт.

Совсем загадочным является утверждение рецензентов, что “квантили малой вероятности превышения годового стока ... к вопросам гидротехнической надежности ГТС не относятся”. В действующем нормативном документе СП 33 – 101 – 2003 есть раздел 5.18 – 5.25 (стр. 9 – 12) “Годовой сток воды его внутригодовое распределение”, в котором (раздел 5.21, стр. 10) написано: “Стандартными квантилями кривых распределения вероятностей стока являются следующие 1 %, 3 %, 5 %, 10 % и 25 % ...”. В нашей статье представлены результаты расчетов для модулей годового стока 1 и 10 %-ной обеспеченности, входящих в указанный ряд обеспеченностей. Естественное любопытство (подобные расчеты делаются впервые) подтолкнуло авторов повторить расчеты для обеспеченностей 0,1 и 0,01 %. Разве не интересно читателю узнать, как обстоят дела и при таких обеспеченностях? Это ведь не проект конкретного инженерного сооружения, а научная статья, и эта информация в ней занимает всего два столбика в табл. 2.

4. Абсолютно не обоснованы выводы авторов о том, что разброс значения квантиля 0,01 % в “неустойчивой” зоне составляет 17 %, а в “устойчивой” — 2,7 %. Указанные значения осредняют величины

от 11,3 до – 5,9 % (первая зона) и от 60,3 до – 10,7 % (вторая зона).

**Комментарий.** Во-первых, среднее относительное отклонение (а не “разброс”) в “устойчивой” зоне для квантиля 0,01 % составляет 0,02, а не 2,7, как утверждает рецензент. Во-вторых, обе цифры (17,2 % — для зоны неустойчивого формирования стока и 0,02 % — для зоны устойчивого его формирования) получаются обычным алгебраическим суммированием:

устойчивая зона

$$\begin{aligned} &((-3,5) + 5,8 + 11,3 + (-6,8) + \\ &+ (-0,8) + (-5,9))/6 = 0,017 \approx 0,02; \end{aligned}$$

неустойчивая зона

$$\begin{aligned} &(18,0 + 28,6 + 11,9 + (-10,7) + 47,0 + 11,9 + \\ &+ 60,3 + (-5,7) + 13,8 + (-3,5))/10 = 17,16 \approx 17,2. \end{aligned}$$

Таким образом, цифры абсолютно обоснованы именно приведенными в статье расчетами. (Возможно, рецензенты под “разбросом” имеют в виду что-то другое, но такого термина в статистике нет. Можно сказать, что дисперсия характеризует разброс, но в приведенных в статье таблицах дисперсия или среднеквадратическое отклонение вообще не рассчитывались.)

5. Вывод о том, что “предложена методика, обеспечивающая получение оценок проектных расходов”, свидетельствует о непонимании авторами проектных задач инженерной гидрологии и о переоценке собственных “научных” достижений.

Комментировать эти эмоции авторы считают излишним.

Рецензия на статью не содержит конструктивной критики по существу ее содержания, а также авторам приписываются выводы, которых они не делали.

Авторы внесли следующие изменения:

в названии табл. 2 появилось слово “годовых”: Отклонения годовых расходов малой обеспеченности, вычисленные по условным и безусловным кривым распределения Крицкого — Менкеля.

в табл. 1 и 2 появились новые колонки с информацией о  $C_v$ ,  $C_s$  и период наблюдений.

Коваленко В. В., доктор техн. наук,  
Гайдукова Е. В., Соловьев Ф. Л., кандидаты техн. наук,  
Голованова Е. Ю., аспирант (РГГУ)

# Об одной вряд ли оправданной бифуркации гидролого-стохастической идеи

Виноградов Ю. Б., доктор техн. наук  
(Государственный гидрологический институт)

Изложено мнение автора о цикле работ В. В. Коваленко и его учеников, посвященных математическому моделированию процессов формирования стока. Имеются в виду стохастические подходы, использующие идею теории марковских процессов.

**Ключевые слова:** марковские процессы, белый шум, стохастические дифференциальные уравнения, формирование стока, уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова.

Некоторые гидрологи и гидротехники из научно-исследовательских и проектных институтов интересовались моим мнением о цикле довольно специфических работ В. В. Коваленко из Российского государственного гидрометеорологического университета (Санкт-Петербург), в частности о статье [2] по гидрологической надежности ГТС. Кратко ответить на задаваемые по этому поводу вопросы крайне затруднительно, так как публикации Виктора Васильевича Коваленко нетривиальны, отягчены сложной терминологией, являются претензией на утверждение нового направления в гидрологии и для полноценного восприятия требуют немалого труда. У многих читателей эти публикации вызвали недоумение, а у основной массы высказывавшихся гидрологов — отторжение. Но ни то, ни другое не было серьезно аргументировано. Я попытаюсь изложить суть построений В. В. Коваленко, какими они мне представляются, сопроводить их комментариями и ссылками, а также высказать обо всем свое личное мнение. В связи с внутренней разноплановостью работ В. В. Коваленко, включающих, помимо всего, методологические, философские (например [14]) и не только гидрологические аспекты, мое изложение будет носить фрагментарный характер.

В работах В. А. Григорьева [4, 5], а затем В. В. Коваленко [6, 1, 7] компилирована идея о преобразовании случайных процессов типа “белого шума” в марковские процессы, которые считаются подходящей моделью для описания последовательностей годового стока. И если такая информация в какой-то мере оправдана в плане некоторого разъяснения сущности марковских последовательностей или иллюстрации их возможного возникновения, то в качестве “нового направления в гидрологии, основанного на использовании стохастических дифференциальных уравнений” [1] она вызывает возражения. Такая реакция требует серьезных пояснений.

Марковский процесс — наиболее простая и популярная стохастическая модель для последовательностей величин годового стока. Случайный процесс, обладающий марковским свойством, от-

личается тем, что его будущее зависит только от настоящего и непосредственно с прошлым не связано. Поэтому исчерпывающей характеристикой марковского процесса является его двухмерный закон распределения вероятностей.

Случайные последовательности нужно рассматривать как функции целочисленных аргументов, так как последние всегда могут быть пронумерованы. Поэтому при обращении ко многим гидролого-статистическим работам мы сталкиваемся с неким формальным противоречием: приходится иметь дело с дискретизированными рядами годовых расходов и одновременно использовать теорию марковских процессов с непрерывным временем. В самих рассматриваемых работах это противоречие не обсуждается. Тем не менее, учитывая, что в действительности такого процесса, как марковский, в природе не существует и это для подходящих систем не более чем удачная аппроксимация, можно полагать, что условие непрерывности траектории процесса не имеет принципиального значения [8].

Основным динамическим уравнением всех марковских процессов является уравнение Чепмена — Колмогорова

$$\begin{aligned} & \varphi[Q(t_2)|Q(t_1)] = \\ & = \int \varphi[Q(t_2)|Q(t_{12})]\varphi[Q(t_{12})|Q(t_1)]dQ(t_{12}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi$  — знак плотности вероятности (в данном уравнении — условной).

Смысл этого уравнения состоит в том, что для того, чтобы перейти из состояния  $Q(t_1)$  в состояние  $Q(t_2)$  за время  $t_2 - t_1$ , процесс  $Q(t)$  в какой-то момент времени  $t_{12}$  должен принять некоторое значение  $Q(t_{12})$ , а затем перейти из этого состояния в состояние  $Q(t_2)$  за оставшееся время  $t_2 - t_{12}$  [9]. Здесь обозначения  $t_1, t_2$  понимаются как моменты времени, соответствующие начальному и конечному состояниям процесса  $Q(t)$ ;  $t_1 \leq t_{12} \leq t_2$ . Под понятием состояние процесса  $Q(t)$  понимается то значение его ординаты, какое он имеет в момент времени  $t$ .

Выраженное уравнением (1) предположение основано на независимости скачка  $\Delta Q$  от какой-либо

предыстории процесса. Достаточно знать лишь значение  $Q$  в момент времени  $t$  (постулат Маркова). Само же уравнение (1) — довольно сложное нелинейное соотношение, связывающее все условные плотности вероятности  $\varphi[Q(t_i)|Q(t_j)]$  друг с другом и имеющее довольно много решений [8].

При ряде предположений на базе уравнения Чепмена — Колмогорова получены два (прямое и обратное) уравнения Колмогорова, различающиеся тем, что плотность вероятности  $\varphi[Q(t_1), Q(t_2)]$  рассматривается соответственно как функция переменных  $t_1, Q(t_1)$  начального состояния или переменных  $t_2, Q(t_2)$  конечного. Прямое уравнение чаще всего называют уравнением Фоккера — Планка. Оно имеет вид

$$d\varphi/dt_2 + d/dQ(t_2)\{A[Q(t_2)]\varphi\} - 0,5d^2/dQ^2(t_2)\{B[t_2]\varphi\} = 0, \quad (2)$$

где  $\varphi = \delta[Q(t_1), Q(t_2)]$ .

Начальным условием для этого уравнения будет

$$\varphi[Q(t_1), Q(t_2)] = \delta[Q(t_2) - Q(t_1)] \quad (3)$$

при  $t_2 = t_1$ .

При соответствующих граничных условиях уравнение Фоккера — Планка определяет условную плотность вероятности как функцию четырех аргументов — начальных значений  $t_1, Q(t_1)$  и конечных  $t_2, Q(t_2)$ .

Полезно иметь в виду, что случайный процесс, описываемый условной вероятностью, удовлетворяющей уравнению (2), эквивалентен так называемому стохастическому дифференциальному уравнению Ито

$$dQ(t_2) = A[Q(t_2)]dt_2 + \sqrt{B[Q(t_2)]}dW(t_2), \quad (4)$$

где  $W(t_2)$  — винеровский процесс, представляющий собой решение уравнения (2) при  $A = 0$  и  $B = 1$ .

Стохастические дифференциальные уравнения не содержат ничего нового по сравнению с уравнением Фоккера — Планка, но обычно они намного удобнее в обращении. В то же время было бы неверным в теоретических построениях избегать уравнения Фоккера — Планка. Оба описания должны рассматриваться как взаимодополняющие [8].

Итак, уравнение (2) обеспечивает преобразование некоторого исходного, обычно “чисто случайного” процесса (белого шума) в марковский процесс, в принципе, с новым законом распределения, корреляционной функцией и параметрами. Поскольку это уравнение, в свою очередь, имеет коэффициенты, связанные с условиями и характером преобразования, то упомянутый новый закон и его параметры непосредственно вычисляются на основе информации о законе распределения и парамет-

рах исходного процесса и коэффициентах  $A$  и  $B$  уравнения Фоккера — Планка. В зависимости от особенностей этой информации в течение некоторого промежутка времени длится переходный процесс, при этом изменение условной плотности вероятности можно воспринимать по аналогии с физическими процессами диффузии и теплопроводности. Именно поэтому марковские процессы с непрерывными траекториями известны и как диффузионные.

Для использования на практике теории марковских процессов с непрерывным временем необходимо убедиться, что они удачно аппроксимируют реальные временные ряды, а главное, очевиден способ определения коэффициентов  $A$  и  $B$ , играющих основную роль в этой теории [10]. Эти коэффициенты в уравнении (2) есть не случайные функции времени, они зависят от свойств исследуемой динамической системы (дифференциального уравнения первого порядка) и определяют особенности марковского процесса. В практических приложениях именно эти, так называемые инфинитезимальные (локальные, рассматриваемые в малом), коэффициенты задаются априори, исходя из их эмпирического смысла и характера процесса [11]. Коэффициент  $A[Q(t)]$  характеризует скорость изменения ординаты  $Q(t)$ , а коэффициент  $B[Q(t)]$  — скорость изменения условной дисперсии этой ординаты. Поэтому первый кратко называют коэффициентом сноса, а второй — диффузии.

Несколько слов о понятии “белого шума”. Это просочившийся из технических приложений термин для “чисто случайного процесса” [12], который для непрерывного времени состоит из некоррелированных смежных импульсов, имеет постоянную для всех частот спектральную плотность и корреляционную функцию, пропорциональную дельте — функции Дирака (имеет бесконечную дисперсию). Белый шум — лишь идеализация, он физически нереализуем, но играет фундаментальную роль в теории, ибо именно к нему восходят многие случайные процессы [8]. И еще важная, не всегда упоминаемая, способность: белый шум может иметь любой закон распределения [12], хотя обычно предполагается нормальным с нулевым средним и конечной дисперсией [13].

Если для стационарного случая следовать [14], то уравнение (2) может быть преобразовано в дифференциальное уравнение

$$d\varphi(Q)/dQ = (Q - k_1)\varphi(Q)/(k_2 + k_3Q + k_4Q^2), \quad (5)$$

порождающее семейство кривых распределения Пирсона, на которое якобы “опирается практическая гидрология” [15]. Последнее утверждение является явным преувеличением. Известно отрицательное отношение к кривым Пирсона, в частности к ранее применявшейся кривой 3-го типа, многих гидрологов, например [16, 17]. Но особо следует



обратить внимание на утверждение, что при переходе уравнения (2) в уравнение (5) коэффициенты последнего “приобретают совершенно определенный физический смысл (“отвечают” за генезис формирования стока)” [18]. Рассмотренный подход предлагается использовать для решения серьезных задач, например при оценке гидрологических последствий антропогенного изменения климата [2]. В этом случае по данным наблюдений предлагается вычислить моменты распределения  $Q$  и далее методами идентификации определить значения параметров модели или ее стохастической модификации. Затем параметры подлежат корректировке в соответствии с климатическим сценарием (учитываются, например, прогнозируемые нормы осадков) и вспомогательными материалами типа регрессионных зависимостей коэффициентов стока от годовых осадков и температуры [15].

В принципе остаются неясными преимущества предлагаемой схемы по сравнению с использованием очевидных балансовых соотношений и статистических зависимостей между климатическими и гидрологическими характеристиками. Действительно, где удобней вносить прогнозируемые климатические коррективы — в привычном мире уравнений водного баланса или же в скрытом от понимания широкой гидрологической общественностью пространстве замысловатым образом пересчитанных переменных? Данный вопрос имеет смысл только в случае приблизительно одинаковой степени подробности описания гидрологической сути происходящих процессов.

А теперь о самом главном. Нет никаких причин игнорировать всю современную физическую гидрологию. Период коэффициентов стока и линейных моделей давно прошел. Формирование стока в полноценном понимании есть многомерный непрерывный процесс с ярко выраженным годовым ходом и другими особенностями, имеющими очевидные физически обусловленные причины, вполне поддающиеся математическому моделированию. В данном случае приходится иметь дело с чем-то вроде символической модели годового стока.

Теперь пора подвести итоги рассмотрения “нового направления в гидрологии”, предложенного в рассмотренных и цитируемых здесь книгах В. В. Коваленко и его учеников [19, 20, 21].

Уравнение Фоккера — Планка является наиболее естественным аппаратом при изучении физических задач определенного типа, но только в том случае если эти задачи связаны с очень простыми дифференциальными уравнениями [22]. Весь достаточный большой набор примеров, имеющихся в специальной литературе по приложениям теории марковских процессов, свидетельствует об этом [9, 10]. Для современного детерминированного и детерминированно-стохастического моделирования такие ограничения недопустимы. Для этого существуют иные подходы.

Что же касается самой идеи поставить уравнение Фоккера — Планка на службу гидрологии, то она оказалась перевернутой с ног на голову. Действительно, уравнение Фоккера — Планка позволяет получить законы распределения, корреляционные функции и параметры процессов, которые становятся марковскими в результате преобразования исходных случайных процессов некоторыми простейшими операторами. В гидрологии же положение дел совсем иное: имеются ряды наблюдений, марковские свойства которых уже подтверждены эмпирически. Поэтому возможности уравнения Фоккера — Планка здесь вроде уже и не нужны, разве что они могут быть использованы для иллюстрации принципиальной возможности преобразования “белого шума” в марковский процесс при некоторых не очень сложных предположениях. В принципе, ситуация представляется почти неправдоподобной, но ее в какой-то степени разъясняет сентенция [1], что все гидрологические карты, по существу, содержат в себе решения уравнения Фоккера — Планка. При построении этих карт их авторы о подобном и не помышляли, а просто пользовались данными наблюдений в рамках обычных картографических обобщений. И здесь присутствуют, по крайней мере, две несуразности: все гидрологические карты построены на основании эмпирического материала без привлечения идеи марковости вообще, а решения уравнения Фоккера — Планка в конечном счете приписываются самой природе.

Создается впечатление, что вся гидрология у В. В. Коваленко в конечном счете свелась к генетической модели и к системе кривых распределения Пирсона (“... в любом случае необходимо выйти на семейство распределений Пирсона ...” [19]). А уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова произвело на него такое неизгладимое впечатление, что им бесстрашно объявлено, что “уравнение ФПК вполне может стать онтологией (базисной моделью) современной гидрологии”! И в этом смысле В. В. Коваленко сравнивает ее роль с таковой формулы Шези в речной гидравлике. Однако не представляются приемлемыми ни аналогия между двумя уравнениями, ориентированными на выполнение несравнимых по своей сути функций, ни утверждение об их значимости в гидрологии и гидравлике.

Таким образом, практическое использование теоретической, замысловато изложенной “генетической модели” пока не представляется возможным. Если у автора помимо статьи [2], абсолютно не отвечающей своему якобы инженерному названию, имеются примеры для практического использования, то их надо приводить и в случае их действительной эффективности (в чем имеются большие сомнения) вносить в нормативные документы (например, в модифицированные СП 33-101-2003).

Современное детерминированное математическое моделирование процессов формирования сто-

ка проводится в пределах естественным образом очерченной предметной области (трехмерного речного бассейна), которое у В. В. Коваленко трактуется как “финитное”. Стохастическое моделирование погоды для обеспечения входа в детерминированную модель стока, само по себе тоже “финитное”, по отношению к этой модели должно трактоваться как “инфинитное”.

Полагаю, что В. В. Коваленко в конце концов интересуется почти исключительно методологическая сторона, причем не только гидрологии, но науки вообще. Однако я не усмотрел в его философско-методологических построениях каких-либо дополнительных возможностей для совершенствования современного детерминированного, стохастического и детерминированно-стохастического моделирования процессов формирования стока и других гидрологических и не гидрологических явлений.

### Список литературы

1. Коваленко В. В. Моделирование гидрологических процессов. — СПб.: Гидрометеоздат, 1993.
2. Коваленко В. В. Оценка гидрологической надёжности гидротехнических сооружений при неустановившемся климате // Гидротехническое строительство. 2010. № 4.
3. Моисеев Н. Н. Алгоритмы развития. — М.: Наука, 1987.
4. Григорьев В. А. Стохастические дифференциальные уравнения речного стока. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. — Алма-Ата: Наука, 1965.
5. Григорьев В. А. Математическое моделирование процесса формирования стока равнинных рек. — Алма-Ата: Наука, 1984.
6. Коваленко В. В. Динамические и стохастические модели гидрологического цикла. — Л.: ЛПИ им. М. И. Калинина, 1988.
7. Коваленко В. В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процессов развития. СПб.: РГГМУ, 1998.
8. Гардинер К. В. Стохастические методы в естественных науках. — М.: Мир, 1986.
9. Карлин С. Основы теории случайных процессов. — М.: Мир, 1971.
10. Свеишиков А. А. Прикладные методы теории случайных функций. — М.: Наука, 1968.
11. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. — М.: Мир, 1984. Т. 2.
12. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1971. Вып. 1.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. — М.: Мир, 1974. Вып. 1.
14. Коваленко В. В. Бифуркации в религиозной философии, естествознании и общем развитии. — СПб.: РГГМУ, 1994.
15. Коваленко В. В., Хаустов В. А. Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование зон ожидаемых аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата // Метеорология и гидрология. 1998. № 12.
16. Великанов М. А. Ошибки измерения и эмпирические зависимости. — Л.: Гидрометеоздат, 1962.
17. Блохинов Е. Г. Распределение вероятностей величин речного стока. — М.: Наука, 1974.
18. Коваленко В. В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процессов формирования стока. — СПб.: РГГМУ, 2004.
19. Коваленко В. В. Частично инфинитный механизм турбулизации природных и социальных процессов. СПб.: РГГМУ, 2006.
20. Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В. Моделирование гидрологических процессов. — СПб.: РГГМУ, 2006.
21. Коваленко В. В. Частично инфинитная гидрология. — СПб.: РГГМУ, 2007.
22. Дуб Дж. Л. Вероятностные процессы. — М.: ИЛ, 1956.

### Рецензия на статью Ю. Б. Виноградова

#### “Об одной вряд ли оправданной бифуркации гидролого-стохастической идеи”

Рецензируемая статья представляет собой критический обзор публикаций профессора В. В. Коваленко, предлагающего новый подход к математическому моделированию гидрологических процессов.

Ю. Б. Виноградов справедливо возражает против заявления В. В. Коваленко о том, что им предложено “новое направление в гидрологии, основанное на использовании стохастических дифференциальных уравнений”.

После попытки популярно разъяснить, каким образом из уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова можно получить стохастические дифференциальные уравнения, позволяющие аппроксимировать реальные временные гидрологические ряды, Ю. Б. Виноградов выражает сомнение в том, что предлагаемый В. В. Коваленко подход может

успешно работать “при оценке гидрологических последствий антропогенного изменения климата”.

Подводя итоги выполненного им подробного анализа построений и суждений В. В. Коваленко, автор рецензируемой статьи справедливо указывает, что читателям произведений В. В. Коваленко “хотелось бы ощутить хотя бы намек на их возможную пользу для гидрологии”.

Завершая статью, Ю. Б. Виноградов отмечает, что он “не усмотрел в философско-методологических построениях В. В. Коваленко каких-либо возможностей для совершенствования современного детерминированного, стохастического и детерминированно-стохастического моделирования процессов формирования стока и других гидрологических и не гидрологических явлений”.

Асарин А. Е., доктор техн. наук

## Поздравление Гургену Гургеновичу Ольховскому



1 февраля 2013 г. исполнилось 80 лет профессору, доктору технических наук, члену-корреспонденту РАН Гургену Гургеновичу Ольховскому.

Г. Г. Ольховский родился 1 февраля 1933 г. в г. Харькове.

Он начал свою трудовую деятельность во Всесоюзном теплотехническом научно-исследовательском институ-

туте (ВТИ) в 1956 г., после окончания Московского энергетического института. За короткое время Гурген Гургенович вошёл в число ведущих специалистов института и уже в 1964 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1979 г. – докторскую диссертацию. С 1985 г. Г. Г. Ольховский был директором ВТИ, с 2010 г. он является президентом ОАО “ВТИ”.

Значительная часть его научной и производственной деятельности связана с разработкой и применением в энергетике газотурбинных и парогазовых установок (ГТУ и ПГУ), с которыми в настоящее время повсеместно связывают возможности существенного повышения эффективности производства электрической и тепловой энергии и сокращения вредных выбросов электростанций в окружающую среду.

В течение последних лет под руководством и при личном участии Г. Г. Ольховского проведены важные для энергетики работы, результаты которых использованы в планах техпервооружения ТЭС России, в проектах конкретного оборудования и электростанций для обеспечения их надежной и экономичной эксплуатации.

Г. Г. Ольховский, крупный ученый, ведущий специалист в области тепловой энергетики, ведет большую общественно-научную деятельность, являясь главным редактором журнала “Электрические станции”, членом редколлегии журнала “Теплоэнергетика”, членом экспертного совета ВАКа, председателем диссертационного совета ОАО “ВТИ”, членом диссертационного совета НИУ “МЭИ”, членом НТС ОАО “ИНТЕР РАО ЕЭС”, председателем комиссии по газовым турбинам

РАН, членом Российского национального комитета МИРЭС. Он постоянно участвует и выступает с докладами на региональных и международных энергетических конференциях.

Г. Г. Ольховский всегда концентрировал усилия коллектива на решении наиболее актуальных проблем теплоэнергетики, проявлял высокую требовательность и научную принципиальность. В последнее время основные его усилия были направлены на эффективную организацию научно-технической и хозяйственной деятельности ВТИ, расширение и повышение качества научных исследований и услуг, увеличение благосостояния сотрудников и привлечение в институт молодых и высококвалифицированных специалистов. Благодаря проводимым мероприятиям по улучшению финансово-экономической, маркетинговой и кадровой деятельности, институт в последние годы работает стабильно с высокими экономическими и научно-техническими показателями.

Гурген Гургенович – человек высокой культуры и эрудиции, требователен к себе и подчиненным, необыкновенно трудолюбив, умеет создавать хорошую деловую обстановку в коллективе. Он пользуется заслуженным авторитетом не только в институте, но и в отрасли как высококвалифицированный, творческий работник. Он является автором более 300 научных работ, в том числе двух монографий, 20 брошюр и обзоров, 8 изобретений. За новаторские разработки в области теплоэнергетики удостоен премии Совета Министров СССР в 1978 г. и дважды – премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 1998 и 2010 гг. В 2000 г. Г. Г. Ольховский избран членом-корреспондентом Академии наук Российской Федерации.

Кроме правительственных премий Г. Г. Ольховский отмечен государственными и отраслевыми наградами. Он награжден орденом Трудового Красного Знамени. Ему присвоены звания “Заслуженный энергетик РФ” (1997 г.), “Заслуженный работник Минтопэнерго РФ” (1998 г.), “Заслуженный работник Единой энергетической системы России” (1996 г.), “Заслуженный энергетик СНГ” (2002 г.), “Почетный работник топливно-энергетического комплекса” (2003 г.).

Поздравляем Гургена Гургеновича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, счастья и творческих успехов.



## Поздравление Владимиру Николаевичу Жиленкову

28 января 2013 г. исполнилось 85 лет профессору, доктору технических наук Владимиру Николаевичу Жиленкову.

В. Н. Жиленков родился в г. Владимире. В 1952 г. окончил гидроэнергетический факультет Московского Энергетического института по специальности гидроэнергетик-гидротехник и по распределению был направлен на инженерную должность в объединение “Гидроспецфундаментстрой” Министерства строительства СССР, где за четыре года прошел путь от мастера до начальника участка.

Наиболее серьезным для него испытанием было руководство строительством железобетонного трехпролетного автодорожного моста через р. Кудьму, приток Волги. Этот мост, построенный за один год, до сих пор находится в исправном состоянии. Затем В. Н. Жиленков руководил строительством, также кессонным способом, двух насосных станций первого подъема в системе водоснабжения г. Казани в связи с предстоящим затоплением прибрежных территорий водохранилищем Куйбышевской (теперь Жигулевской) ГЭС. В то же время по этой причине пришлось начинать строительство центральной станции канализации города. Именно здесь он проявил свою новаторскую одаренность, предложив способ автобаллаستировки кессонных камер с использованием направленного действия на вмещающий сооружение несвязный грунт гидродинамических сил при быстром снижении давления воздуха в камере. Впоследствии этот эффективный способ нашел широкое распространение при строительстве ряда конструктивно аналогичных сооружений.

В 1956 г. В. Н. Жиленков поступил в аспирантуру при Всесоюзном научно-исследовательском институте гидротехники им. Б. Е. Веденеева, где работает до настоящего времени, пройдя путь от младшего до главного научного сотрудника, включая двадцатилетний период (1974 – 1994 гг.), когда он заведовал ведущей отраслевой лабораторией фильтрационных исследований.

В 1964 г. В. Н. Жиленков защитил кандидатскую диссертацию по проблеме оценки сопротивления в теле и основании бетонной гравитационной плотины, предложив решения ряда задач, какие обычно возникают при детальном рассмотрении условий формирования фильтрационных потоков в подобных случаях.

Однако основным направлением его научной деятельности явилось изучение геогидравлических свойств грунтов (в том числе скальных) и грунтовых материалов, нацеленное на разработку критериев проектирования водоупорных и дренажных



устройств, включая элементы подземного контура гидротехнических сооружений. В. Н. Жиленков постоянно занимается совершенствованием в этом направлении методов экспериментальных исследований, а также разработкой новых конструкций и технологических средств возведения плотин, главным образом из грунтовых материалов. Особенно значимыми были исследования, в результате которых удалось получить доказательства безальтернативного использования в качестве материала ядра Нурекской плотины супесчано-щебнистого грунта Сафедобского месторождения.

За годы работы в институте он был ответственным исполнителем более 100 НИР, результаты которых представлены в 150 публикациях, включая 12 нормативно-методических пособий и соответствующие разделы СНиПов, а также в 57 авторских свидетельствах и патентах на изобретения. За успешное и эффективное внедрение некоторых из них в строительное производство ему в 1991 г. присвоено почетное звание “Заслуженный изобретатель Российской Федерации”. Прежние его достижения в совершенствовании научных и конструктивно-технологических основ осуществленного в советский период строительства многих гидротехнических сооружений отмечены орденом “Знак почта” и многими другими отличиями отраслевого уровня.

Результаты исследований и инженерные разработки В. Н. Жиленкова широко использовались при проектировании и строительстве целого ряда плотин из грунтовых материалов: Асуанской, Нурекской, Плявиньской, Капчагайской, Усть-Хантайской, Усть-Среднеканской, Братского гидроузла, высотной плотины Айос Теодорос на Кипре и водохранилищных плотин Билибинской, Ташлыкской и Хмельницкой АЭС.

Накопленный производственный опыт и найденные научно обоснованные решения вопросов



## Поздравление Алексею Александровичу Романову

13 февраля 2013 г. исполнилось 80 лет кандидату технических наук, члену-корреспонденту Академии электротехнических наук и Российской экологической академии, лауреату Государственной премии СССР Алексею Александровичу Романову.

А. А. Романов родился 13 февраля 1933 г. в Татарской АССР. В 1950 г. окончил Казанское ремесленное училище № 4, в 1962 г. Куйбышевский индустриальный институт им. В. В. Куйбышева.

После окончания института А. А. Романов работал на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина начальником смены электроцеха, дежурным инженером станции. В 1970 г. становится главным инженером, в 1976 г. назначается директором ГЭС. В августе 1996 г. в качестве генерального директора он возглавил ОАО «Волжская ГЭС им. В. И. Ленина».

А. А. Романов является автором трех изобретений и трех патентов, способствующих повышению надежности энергоснабжения. Им опубликовано 49 научных статей и докладов, издано учебное пособие по проектированию электрической части подстанций. Ему присуждены ученая степень кандидата технических наук (1996 г.), ученые звания профессора (1997 г.), доктора наук Академии электротехнических наук (1995 г.), члена-корреспондента Академии электротехнических наук (1997 г.), члена-корреспондента Российской экологической академии (1996 г.), действительного члена Междуна-



родных академий энергоинформационных наук (1997 г.) и информатизации (2000 г.).

А. А. Романову присвоено звание лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники за разработку конструкций, освоение промышленного производства тяжело нагруженных эластичных металлопластмассовых опор скольжения и их широкое внедрение на гидроагрегатах крупнейших ГЭС страны (1985 г.).

Он награжден орденом Трудового Красного Знамени (1981 г.), медалями «За доблестный труд», в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», «Ветеран труда» (1985 г.), медалью Жукова (1996 г.), удостоен званий «Заслуженный энергетик РСФСР» (1989 г.), «Почетный энергетик» (1993 г.), «Заслуженный работник Минтопэнерго России» (1993 г.), «Заслуженный работник Единой энергетической системы России» (1996 г.), «Ветеран энергетики» (2001 г.), «Выдающийся энергетик 20-столетия» с вручением именной медали (2001 г.), отмечен знаком «Изобретатель СССР» (1987 г.), золотой (1981 г.) и двумя серебряными (1975 и 1976 гг.) медалями ВДНХ СССР.

Алексей Александрович – почетный гражданин города Жигулевска (1987 г.).

Сердечно поздравляем Алексея Александровича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья и творческих успехов.

обеспечения нормального и устойчивого фильтрационного состояния водоподпорных сооружений представлены В. Н. Жиленковым в его докторской диссертации «Основы инженерной оценки водопоглощающей и фильтрационной прочности грунтов», которую он защитил в 1988 г.

Вскоре он был кооптирован в диссертационные советы при ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, а затем – Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, был избран членом Советского комитета Международной ассоциации по гидравлическим исследованиям (МАГИ).

В. Н. Жиленков активно участвовал в геоэкологических исследованиях, связанных с решением проблем складирования промышленных отходов, в частности золоотвалов ТЭС и ряда объектов, расположенных в городской черте. В качестве специалиста по этим вопросам неоднократно возглавлял комиссии по экспертизе проектов в Комитете по экологии г. Санкт-Петербурга.

Сердечно поздравляем Владимира Николаевича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, счастья и творческих успехов.

## Морские берега — эволюция, экономика, экология и дреджинг

Шилин М. Б., профессор

(Российский государственный гидрометеорологический университет)

1 – 6 октября 2012 г. на базе Туапсинского филиала Российского государственного гидрометеорологического университета (г. Туапсе Краснодарского края) состоялась XXIV Международная береговая конференция “Морские берега — эволюция, экология, экономика”. Конференция была организована Рабочей группой “Морские берега” (РГМБ) Совета Российской Академии наук по проблемам Мирового океана совместно с Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ, г. Санкт-Петербург) и филиалом РГГМУ в г. Туапсе. Конференция была посвящена 60-летию со дня основания РГМБ, что нашло отражение в тематике многих докладов.

Оргкомитет конференции возглавили два сопредседателя: д.г.н., профессор МГУ им. М. В. Ломоносова, действующий председатель РГМБ

Л. А. Жиндарев и д.г.н., профессор РГГМУ, директор филиала РГГМУ в г. Туапсе Е. А. Яйли. В состав оргкомитета вошли такие известные береговеды и специалисты в области рационального берегопользования, как ректор РГГМУ Л. Н. Карлин, профессор Дальневосточного федерального университета ДВФУ, председатель Общества изучения Амурского края П. Ф. Бровко, профессор РГГМУ (филиал, г. Туапсе), чл.-корр. Академии наук Чеченской Республики Д. С. Темиров, профессор Барнаульского государственного университета А. Ш. Хабидов, профессор Одесского национального университета Ю. Д. Шуйский (Украина), профессор Каарел Орвику (Эстония), сотрудники Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) Р. Д. Косьян и И. О. Леонтьев, а также другие.

Благодаря усилиям технических секретарей д.э.н. Г. Г. Гогоберидзе и Ю. А. Ледновой (РГГМУ), на конференции царил дружеская деловая атмосфера.

В работе конференции приняли участие более 100 человек — сотрудников институтов Российской Академии наук, университетов и других высших учебных заведений, научных и научно-производственных организаций, а также представители частных и государственных компаний, занимающихся проектно-изыскательскими, горнотехническими, строительными работами и мониторингом природной среды в прибрежно-морской зоне. Российские участники представляли 12 городов — от Калининграда на западе до Владивостока и Южно-Сахалинска на востоке страны. В работе конференции участвовали также более 20 зарубежных экспертов из Абхазии, Болгарии, Германии, Испании, Нидерландов, Турции, Украины и Эстонии.

Впервые за всю историю Береговых конференций была организована и успешно проведена дреджинговая секция, посвященная вопросам строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, экологической безопасности дноуглубительных и берегонамывных работ в береговой зоне. Инициатором и активным организатором секции выступила экологическая комиссия Центральной дреджинговой ассоциации (ЦЕДА). Представитель экологической комиссии профессор М. Б. Шилин был включен организаторами конференции в состав оргкомитета. В ходе конференции в работе



**Рис. 1.** Столица края – г. Краснодар (слева сверху – памятник Екатерине Великой, присоединившей Краснодарский край к России в конце XVIII в.); столица зимней Олимпиады 2014 г. – Сочи (справа сверху – здание Морского вокзала, построенное в 1950-е годы в стиле “сталинского ампира”); туапсинский порт (внизу)!





**Рис. 2.** Береговая зона Краснодарского края: развитие должно стать устойчивым!

дреджинговой секции приняли активное участие делегаты ЦЕДА — генеральный менеджер А. Ксити и председатель экологической комиссии П. Лабойри.

Место проведения конференции было выбрано оргкомитетом не случайно. Краснодарский край обладает единственным в России Черноморским побережьем. После распада Советского Союза и утраты крымских портов федеральное правительство направило финансовые потоки на развитие инфраструктуры таких портов Краснодарского края, как Новороссийск, Туапсе, Тамань и Сочи (рис. 1). Последний из названных городов выбран столицей зимних Олимпийских игр 2014 г. Стремительное развитие береговой зоны, строительство новых портовых комплексов и реконструкция действующих портов требуют учета всего разнообразия экологических, экономических и социальных факторов. Все это стало лейтмотивом указанной конференции.

Конференция проходила непосредственно в береговой зоне Черного моря (рис. 2), в живописном поселке Ольгинка, расположенном в 25 км от г. Туапсе, в месте впадения в море горных рек Ту и Кабак. Крутой туапсинский берег известен в среде гидрометеорологов и специалистов по опасным природным явлениям частыми смерчами (рис. 3).

Поселок Ольгинка возник в конце XIX в. на месте казачьей станицы. К числу первых каменных поселковых строений относится небольшой особняк в стиле “модерн”, построенный по распоряжению императора Александра III для дочери Ольги.

В соответствии с общим посвящением конференции ее стартовая научная сессия проходила в контексте 60-летнего юбилея РГМБ и ее ключевых направлений работы, означенных в виде пленарных докладов.

После торжественного открытия конференции (рис. 4) исторический обзор деятельности Рабочей группы (от момента основания до сегодняшнего дня) был сделан в совместном докладе действующего



**Рис. 3.** Смерч является частым природным явлением у туапсинского берега

щего председателя РГМБ Л. А. Жиндарева и бесменного ученого секретаря Рабочей группы С. А. Лукьяновой “60 лет Рабочей группе “Морские берега””. В докладе отмечено, что деятельность РГМБ всегда направлена на формирование научной базы рационального берегопользования и на преодоление конфликтов в береговой зоне между различными природопользователями. Усилия РГМБ направлены на обобщение и анализ информации по береговым исследованиям на всех морях России, ее распространение и доведение до нуждающихся в ней пользователей.

Основные современные направления работы РГМБ были освещены в докладах П. Ф. Бровко (ДВФУ), В. В. Мелентьева (Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Ф. Нансена, г. Санкт-Петербург), А. Ш. Хабидова (Барнаульский ГУ, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН) и Г. Г. Гогоберидзе (РГГМУ), сделанных в рамках концепции сохранения и поддержания приемлемого уровня экологической стабильности при современных темпах экономического развития прибрежно-морской зоны.



**Рис. 4.** Открытия Конференции. Слева направо: члены Оргкомитета Д. С. Темиров, Е. А. Яйли (зачитывает приветственное слово Оргкомитета), Л. А. Жиндарев (действующий председатель РГМБ)

Последующие научно-практические доклады были разделены на пять секций:

I. Секция “Морфология морских берегов” (конвиньер Ю. Д. Шуйский) является традиционной для Береговых конференций. Помимо теоретических докладов, посвященных вопросам геоморфологии, на секции были сделаны сообщения, имеющие практическую направленность. Это доклад В. М. Пешкова (ОАО “Кубаньводпроект”) “Защита морских берегов искусственными пляжами” и доклад И. О. Леонтьева (ИО РАН) “Прогноз эволюции песчаных кос”.

II. Секция “Рациональное берегопользование” (конвиньер Д. С. Темиров) была посвящена вопросам оценки и контроля рекреационной нагрузки на береговую зону (П. Ф. Бровко), морского пространственного планирования (С. А. Оганова, РГГМУ) и анализу факторов риска (Г. Л. Кофф, Институт водных проблем РАН, г. Москва).

III. Секция “Принципы и проблемы организации и проведения мониторинга береговой зоны” (конвиньер А. Ш. Хабидов) объединила доклады, посвященные мониторинговым наблюдениям за состоянием прибрежно-морской зоны. Наибольший интерес вызвали доклады “Результаты мониторинга береговой зоны Финского залива” (Д. В. Рябчук, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, г. Санкт-Петербург) и “Формирование системы мониторинга морских портов” (Я. Ю. Блиновская, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток). В обоих докладах представлены эффективно действующие структуры мониторинга и результаты многолетних мониторинговых наблюдений.

IV. Секция “Экологическая уязвимость берегов к антропогенной нагрузке” (конвиньер П. Ф. Бров-



**Рис. 5.** Конвиньеры “дреджинговой секции” — председатель Экологической комиссии ЦЕДА П. Лабойри и профессор РГГМУ М. Шилин

ко) рассмотрела способы и методы оценки экологической уязвимости береговой зоны. В докладе “Влияние изменения антропогенной нагрузки на устойчивость системы “берег – море” на примере побережья Абхазии” (Р. С. Дбар, Абхазский государственный университет, г. Сухум) концепция уязвимости прибрежно-морской зоны применена по отношению к Черноморскому побережью Абхазии. Большой интерес у участников и оживленную дискуссию вызвал доклад Я. Ю. Блиновской “Методические подходы к выделению в замерзающих морях районов, ограниченных для деятельности нефтегазового комплекса”, в котором представлена методическая разработка, выполненная группой экспертов по инициативе Российского Всемирного фонда дикой природы (WWF — Москва и Мурманск).

V. Секция “Гидротехническое строительство и дреджинг в береговой зоне” была организована по инициативе и при участии экологической комиссии ЦЕДА. Это была единственная секция конференции, рабочим языком которой был английский. Заседание секции вели П. Лабойри и М. Шилин (рис. 5).

На секции было сделано шесть докладов: “Уроки и опыт строительства Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений” (М. Беккер, Boskalis Russia, г. Москва); “Проблемы проектирования и строительства гидротехнических сооружений на побережье Большого Сочи” (К. Н. Макаров, Сочинский государственный университет); “Основные проблемы берегозащиты побережья Имеретинской низменности” (Г. Л. Кофф); “Вопросы строительства на Черном море новых портовых комплексов на примере порта Филиос (Турция)” (М. Хэйсманс, Виттевейн Бос); “Критерии экс-





Рис. 7. Общее фото участников конференции

пресс-оценки экологической безопасности гидростроительства” (В. А. Жигульский, ООО “Эко-Экспресс-Сервис”, г. Санкт-Петербург); “Концепция эко-дружественного порта Усть-Луга” (М. А. Мамаева, РГГМУ).

В заключение работы секции М. Б. Шилиным была сделана презентация русского перевода научно-методического справочника ЦЕДА “Экологические аспекты дреджинга” (“Environmental Aspects of Dredging”, 2008). Перевод выполнен сотрудниками РГГМУ в 2010 – 2011 гг. и получил одобрение российских и голландских экспертов. Издание книги на русском языке запланировано на 2013 г. в издательстве РГГМУ. Презентация перевода справочника, обобщающего мировой опыт обеспечения экологической безопасности берегонамывных и дноуглубительных работ, вызвала живой интерес у участников конференции. Предполагается, что издание на русском языке будет сопровождаться рекомендацией РГМБ.

Параллельно с работой секций на конференции была организована стендовая сессия, многие доклады которой заслужили самые высокие оценки экспертов. Большой интерес вызвали материалы по проекту общественно-делового “Лахта-Центра” на северном берегу Финского залива (А. Н. Чусов, Ю. В. Гуляк, Т. М. Оболонская и др.). Проблемам этого же побережья был посвящен стенд “Оценка и прогнозирование зон затопления прибрежных территорий в результате ввода в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений в Невской губе” (Р. Е. Ванкевич, А. В. Исаев, Е. В. Софьина). Прикладные аспекты проблемы нормирования антропогенного воздействия на водную среду прибрежных зон рассмотрела

А. А. Стоцкая (РГГМУ). Индикаторная оценка влияния антропогенной нагрузки водосборных бассейнов на прибрежную зону была дана в материалах Д. А. Домнина (Атлантическое отделение ИО РАН, г. Калининград). Динамика отложений на черноморских пляжах была представлена на стенде В. В. Крыленко с соавторами (Южное отделение ИО РАН, г. Геленджик).

В общей сложности в течение четырех дней работы конференции на пяти научных сессиях было заслушано 46 устных и проведено обсуждение 124 стендовых докладов. Основное содержание докладов было посвящено вопросам и проблемам рационального берегопользования (применительно к различным географическим зонам и типам берегов), использования современных методов исследований и опыта наилучшей практики в изучении динамики морских берегов, анализа опыта использования традиционных и новых технологий в рамках мониторинга морских берегов. Во многих докладах были предложены усовершенствования традиционных методов оценки состояния берегов и новые методы проведения береговых работ и контроля за состоянием прибрежно-морских зон.

В представленных докладах и в последующей дискуссии была отмечена возрастающая роль прибрежной зоны в хозяйственном и рекреационном развитии регионов России, в решении вопросов социальной и экономической значимости. Отмечена необходимость скорейшего решения вопросов оценки уязвимости берегов, организации их мониторинга, научно-методического обеспечения рационального берегопользования и сохранения высокого качества природной среды берегов. Значительная часть докладов была в той или иной степени

связана с темой экологической безопасности прежде всего применительно к строительным, гидротехническим, горно-инженерным и дреджинговым работам в прибрежно-морской зоне.

Во время докладов российскими и зарубежными участниками конференции отмечалась необходимость изучения береговой зоны, используя не только отдельные показатели и характеристики, но и комплексный, интегральный подход.

География представленных докладов охватила многие береговые зоны различных морей с акцентированием на особенностях того или иного вида берегов. Значительная часть докладов была представлена в рамках подготовки к зимней Олимпиаде в Сочи в 2014 г. и активного строительства существующих и новых портов как на российском побережье Черного моря, так и на абхазской и украинской частях побережья. Второй важный блок докладов охватил восточную и юго-восточную части береговой зоны Балтийского моря, для которых были рассмотрены гидро-, морфо- и литодинамические процессы, а также уровни уязвимости берегов по отношению к различным видам антропогенной деятельности. В этом блоке докладов акцент был сделан на оценку эффектов от таких крупных гидротехнических комплексов, как КЗС и порт Усть-Луга. На дреджинговой секции отечественные и зарубежные эксперты поделились опытом наилучшего строительства портовых комплексов и проведения дноуглубительных и берегонамывных работ на Черном и Балтийском морях.

Необходимо отметить, что в настоящее время береговые изыскания всё больше привлекают внимание молодых исследователей, студентов и аспирантов, о чем свидетельствует их активное участие в работе конференции (рис. 7).

На основе представленных в докладах материалов и в результате их обсуждения конференция рекомендовала:

1. Обратит внимание на необходимость сохранения и поддержания наследственности и преемственности в развитии береговой науки. Привлекать к работе в составе РГМБ новых членов, как известных ученых, так и молодых специалистов, в том числе студентов и аспирантов.

2. Инициировать активное сотрудничество с администрациями приморских регионов для разработки пакета законодательных актов по регламентации деятельности природопользователей в прибрежной зоне, а также для проведения инвентаризации природно-ресурсного потенциала примор-

ских территорий и прилегающих акваторий с составлением кадастра береговых зон приморских субъектов и районов Российской Федерации.

3. Обратит особое внимание региональных администраций на уникальные природные образования в береговой зоне, такие, как косы и пересыпи-барьеры (Анапская, Куршская, Вислинская, Чайво, Пильтун и др.). Рекомендуются разработка для каждого из уникальных природных образований научно-обоснованных территориальных схем развития с определением допустимых видов хозяйственной деятельности, с запретом изъятия песчаного материала и контролем пешеходной и транспортной нагрузки.

4. Имея в виду диверсификацию экономики некоторых приморских регионов, подчеркнуть целесообразность развития новых направлений берегопользования, поддержания развития марикультурных хозяйств, рекреационно-оздоровительных комплексов и др.

5. Учитывая трансграничный характер природных процессов в береговой зоне окраинных морей, отметить целесообразность проведения регулярного мониторинга состояния побережий и акваторий в прилегающих административных областях, а также согласования планов освоения побережий администрациями приграничных районов.

6. Акцентировать внимание природопользователей на литодинамические и сейсмические особенности прибрежных территорий, а также на те явления, проявления активности которых относятся к низким и редко повторяющимся, но которые служат факторами риска хозяйственной деятельности.

7. Способствовать расширению внутрироссийских и международных контактов экспертов-береговедов в рамках международных береговых программ не только с привлечением научного сообщества, но и административных и производственных ресурсов.

8. Провести следующую, XXV Береговую конференцию в 2014 г. в г. Сочи (на базе ОАО ЦНИИС “Морские берега”) или г. Ростове-на-Дону (на базе Южного центра РАН).

Материалы конференции опубликованы в сборнике “Морские берега — эволюция, экология, экономика / Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы “Морские берега” (Туапсе, 1 – 6 октября 2012 г.)” — В 2-х т. — Краснодар: Издательский дом “Юг”, 2012.

### Строительство Богучанской ГЭС

ОАО “Богучанская ГЭС” получила разрешение Енисейского управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) на допуск в эксплуатацию гидроагрегата № 4 установленной мощностью 333 МВт. ГА № 4 переведен в режим постоянной промышленной эксплуатации. Испытания на холостом ходу ГА № 4 начались 17 декабря 2012 г. После выполнения программы испытаний 25 декабря 2012 г. агрегат был впервые включен в сеть под нагрузку. Совокупная проектная мощность четырех действующих агрегатов составила 1332 МВт.

Эксплуатация ГА № 4 будет осуществляться в период вывода из работы одного из действующих гидроагрегатов первого пускового комплекса ГА № 1, 2, 3. Такая схема работы обусловлена сетевыми ограничениями, связанными с неготовностью объектов схемы выдачи мощности на напряжение 500 кВ. ГА № 4 допущен в эксплуатацию при условии работы не более трех агрегатов с совокупной нагрузкой станции не более 470 МВт при выдаче в сеть 220 кВ по постоянной схеме энергоснабжения. Предполагается, что с вводом агрегата № 4 суточная выработка превысит 10,5 млн. кВт·ч.

Первые три агрегата № 1, 2 и 3 введены в промышленную эксплуатацию 27 ноября 2012 г., а с 1 декабря 2012 г. станция начала поставки на оптовый рынок. В первой декаде января 2013 г. выработка ежесуточно составляла более 8,6 млн. кВт·ч.

25 декабря 2012 г. начались испытания на холостом ходу ГА № 5. После достижения готовности схемы выдачи мощности на 500 кВ будет уточнен график пусков оставшихся пяти гидроагрегатов (№ 5, 6, 7, 8, 9). Пуск станции на проектную мощность 3000 МВт с вводом всех девяти гидроагрегатов будет зависеть от сроков наполнения водохранилища до проектной отметки 208,0 м. Эту отметку планируется набрать в течение 2013 – 2014 гг. Во второй декаде ноября 2012 г. уровень Богучанского водохранилища стабилизировался на отметке 185,0 м. Повышение уровня в течение зимы 2012 / 13 г. не планируется.

### Строительство Загорской ГАЭС-2

На станционном узле Загорской ГАЭС-2 проведены испытания вспомогательного и генерирующего оборудования первого пускового комплекса станции, включающие тестовый пуск двух обратимых гидроагрегатов в режиме синхронного компенсатора. Испытания гидротурбинного оборудования

показали, что все системы и узлы работают в штатном режиме, вибрация в норме. В соответствии с графиком работ в марте 2013 г. временная перемишка в нижнем бассейне ГАЭС будет разобрана, и гидрогенерирующее оборудование пройдет испытание во всех рабочих режимах: насосном, турбинном и синхронного компенсатора.

Испытания первого пускового комплекса проведены специалистами ОАО “Загорская ГАЭС-2” под руководством генерального директора В. Магрука и главного инженера И. Данилова, которые принимали участие в пуске первого гидроагрегата действующей Загорской ГАЭС-1 25 лет назад. Тестовый пуск гидроагрегата проводился в присутствии представителей генерального подрядчика строительства – ОАО “ЭСКО ЕЭС”, подрядных организаций и шеф-инженеров предприятий, изготовивших оборудование.

Ввод первой очереди гидроаккумулирующей станции будет происходить по мере сдачи в эксплуатацию ФСК ЕЭС двухцепной линии электропередачи 500 кВ “Загорская ГАЭС–Ярцево 1” и “Загорская ГАЭС–Ярцево 2” в рамках договора технологического присоединения. Работа на этом объекте задерживается в частности из-за нерешенных вопросов по землеотводу.

До ввода ЛЭП Загорская ГАЭС-2 будет работать по временной схеме, которая не позволит осуществить включение всех гидроагрегатов в сеть. ОАО “РусГидро” изучает потенциальные варианты компенсации доходов, выпадающих по причине неготовности объектов ФСК ЕЭС, и планирует предпринять необходимые меры по минимизации возможных негативных финансовых последствий, в том числе перевод штрафных санкций на сетевую компанию.

### Реконструкция Камской ГЭС

Установленная мощность Камской ГЭС увеличилась с 522 до 531 МВт. Повышение мощности зафиксировано в ходе комплексных и натурных энергетических испытаний, подписаны соответствующие акты по гидроагрегатам № 9, 17, 22. Увеличение произошло за счет модернизации гидроагрегатов с заменой турбин, выполненной в рамках реализации Программы комплексной модернизации объектов РусГидро. На всех гидроагрегатах выполнена замена рабочих механизмов турбин, камер рабочего колеса, генераторных выключателей, охладителей статора гидрогенераторов; заменена обмотка статоров. Комплекс выполненных работ повысил надежность работы гидроагрегатов



и улучшил их эксплуатационные характеристики. Кроме того, модернизация рабочих колес турбин позволила значительно снизить экологические риски.

С 1997 г. на станции модернизированы 20 из 23 работающих гидроагрегатов. Завершить модернизацию гидроагрегатов планируется в 2014 г. В итоге установленная мощность Камской ГЭС вырастет до 552 МВт. Замена основных элементов вертикальных турбин является главным направлением Программы комплексной модернизации Камской ГЭС. Помимо этого Программа включает мероприятия по замене гидромеханического оборудования. На 2014 г. запланировано начало проектных работ по замене 24-го, экспериментального горизонтального гидроагрегата, который был демонтирован в 1992 г.

На станции ведутся масштабные работы по переоснащению системы автоматизированного управления агрегатами (САУ). До конца 2016 г. планируется заменить системы управления на десяти гидроагрегатах, а также начать работы по созданию САУ открытого распределительного устройства.

### **Реконструкция Волжской ГЭС**

Установленная мощность Волжской ГЭС по состоянию на 1 января 2013 г. выросла на 15,5 МВт и составила 2608 МВт вместо прежних 2592,5 МВт. Увеличение мощности станции является результатом реализации Программы комплексной модернизации гидроэлектростанции. Устаревшие гидротурбины заменены на современные, изготовленные ОАО “Силовые машины”, что позволило увеличить мощность ГА № 12 со 115 до 125,5 МВт, а ГА № 19 – со 115 до 120 МВт.

Программа комплексной модернизации Волжской ГЭС направлена на полную замену отработавшего свой срок оборудования на современное, отвечающее последним достижениям науки и техники. Программа рассчитана до 2025 г. К этому времени планируется заменить все 23 гидроагрегата, что позволит увеличить установленную мощность Волжской ГЭС на 198,5 МВт. В итоге установленная мощность станции достигнет 2739,5 МВт.

На Волжской ГЭС установлено 23 гидроагрегата различной мощности: тринадцать гидроагрегатов имеют мощность 115 МВт, четыре – 125,5 МВт, пять – 120 МВт, один – 11 МВт.

### **Реконструкция Чебоксарской ГЭС**

В соответствии с Программой комплексной модернизации ОАО “РусГидро” провело модернизацию ГА № 4 Чебоксарской ГЭС. Инженеры завода-изготовителя реконструировали механизм поворота лопастей рабочего колеса турбины и восстано-

вили поворотной-лопастной режим ее работы. Модернизация позволит менять угол поворота лопастей турбины в зависимости от нагрузки и напора, обеспечивая тем самым максимальную выработку электроэнергии при минимальном расходе воды. Кроме этого в ходе крупномасштабной реконструкции ГА № 4 специалисты дочерней компании ОАО “РусГидро” – ОАО “Турборемонт-ВКК” заменили железо обода ротора генератора на новое. После завершения всего комплекса работ и проведения пуска наладочных испытаний с участием специалистов филиала ОАО “РусГидро” – “Чебоксарская ГЭС”, подрядных монтажных организаций и шеф-инженера ОАО “Силовые машины” ГА № 4 введен в эксплуатацию.

ОАО “Силовые машины” начало реконструкцию гидроагрегатов Чебоксарской ГЭС в 2007 г. с модернизации механизма поворота лопастей рабочего колеса ГА № 7. В 2010–2012 гг. энергомашиностроительная компания реконструировала рабочие колеса ГА № 16 и 8. В 2011 г. ОАО “Силовые машины” и ОАО “РусГидро” заключили договор на реконструкцию еще семи рабочих колес. В настоящее время ОАО “Силовые машины” восстанавливает поворотной-лопастной режим работы рабочего колеса ГА № 15, который планируется ввести в работу в третьем квартале 2013 г. Для аналогичной модернизации на завод-изготовитель доставлены: корпус, лопасти и другие узлы рабочего колеса ГА № 6. Его ввод в эксплуатацию запланирован на четвертый квартал 2013 г. Поставка последнего из семи реконструируемых рабочих колес планируется в мае 2016 г.

Гидроагрегаты Чебоксарской ГЭС имеют экологически безопасную конструкцию с безмасляными втулками рабочих колес. Данный проект разработан в 1970-е гг. на ЛМЗ, который в 1980-е гг. изготовил оборудование для Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС. В 2006 г. ОАО “Силовые машины” выполнило проект реконструкции рабочего колеса.

В октябре 2012 г. ОАО “Силовые машины” и ОАО “РусГидро” расширили сотрудничество, заключив договор на модернизацию восьми гидрогенераторов. После их обследования и разработки проекта ОАО “Силовые машины” изготовит восемь комплектов статоров с необходимым оборудованием для комплектации гидрогенераторов и обеспечит шеф-монтаж поставляемого оборудования. Поставка первого из восьми комплектов запланирована на январь 2014 г., последнего – на февраль 2017 г.

### **Верхне-Нарынский каскад**

ОАО “Ленгидропроект” стало победителем конкурса на разработку ТЭО строительства Верх-



не-Нарынского каскада ГЭС в Киргизии. Конкурс проводился в рамках реализации Соглашения между Правительством России и Правительством Киргизии о строительстве и эксплуатации Верхне-Нарынского каскада ГЭС, подписанного 20 сентября 2012 г. По предварительной оценке суммарная установленная мощность четырех ГЭС каскада: Акбулунской, Нарынских ГЭС 1, 2 и 3 – должна составить 191 МВт, а среднегодовая выработка – 1055 млн. кВт·ч. Электроэнергия каскада ГЭС может быть использована для обеспечения горно-обогатительных предприятий и жителей Нарынской области Киргизии, а также в целях экспорта в сопредельные страны. Окончательная стоимость каскада ГЭС и сроки строительства будут определены в ТЭО.

Желание принять участие в конкурсе, о начале которого было объявлено 27 ноября 2012 г., кроме ОАО “Ленгидропроект” изъявили ЗАО “Комплексный проектно-изыскательский институт “Гидроэнергопроект” (г. Москва) и ПАО “Укргидропроект” (г. Харьков, Украина). Церемония вскрытия конвертов прошла 29 декабря 2012 г. Победителем было объявлено ОАО “Ленгидропроект”, предложения которого имели самую низкую цену и наиболее полно отвечали требованиям конкурсной документации. Разработка ТЭО должна быть завершена в течение трех месяцев со дня подписания договора между ОАО “Ленгидропроект” и ЗАО “Верхне-Нарынские гидроэлектростанции”.

Для реализации проекта учреждено совместное предприятие (СП) ЗАО “Верхне-Нарынские гидроэлектростанции” с паритетным распределением долей в уставном капитале ОАО “РусГидро” и ОАО “Электрические станции”. Предполагается, что 50 % необходимых для строительства средств будут предоставлены ОАО “РусГидро” для внесения в уставный капитал СП. Остальные 50 % будут обеспечены Российской Федерацией в качестве заемных средств. Киргизская сторона внесет в уставный капитал СП земельные участки под строительство каскада и другие активы. Полностью схема финансирования и параметры участия ОАО “РусГидро” в финансировании будут определены после разработки ТЭО.

### ОАО “Институт Гидропроект”

Специалисты ОАО “Институт Гидропроект” завершили основной этап работ по исследованию возобновляемых энергоресурсов Северного Кавказа. Разработаны схемы использования гидроэнергетических ресурсов рек Терек, Кубань, Сулак, Самур. Исследования проводились в рамках программы НИОКР ОАО “РусГидро” в период 2011 и 2012 гг. В процессе исследований выполнена оценка всех

категорий гидроэнергетического потенциала рек Северного Кавказа: валового (теоретического), технического и экономического. Эта оценка уточняет результаты расчетов, изложенных в классическом труде “Гидроэнергетические ресурсы СССР” под редакцией А. Н. Вознесенского, 1967 г.

По оценке ОАО “Институт Гидропроект” экономический гидроэнергетический потенциал крупных и средних рек бассейнов Кубани, Терека, Сулака и Самура составляет 22,4 млрд. кВт·ч, что на 10 % ниже оценки 1967 г. Уточнения связаны с учетом гидрологических наблюдений за стоком рассматриваемых водотоков, современных и перспективных водохозяйственных требований по водообеспечению других отраслей народного хозяйства, изменившихся энергоэкономических предпосылок и других факторов. К настоящему времени освоено 9,66 млрд. кВт·ч, более 40 % экономического потенциала.

Специалисты ОАО “Институт Гидропроект” обосновали перспективы развития гидроэнергетики как региона в целом, так и его субъектов федерации. Выявлены перспективные ГЭС, рекомендованные для включения в Схемы территориального планирования (СТП) субъектов федерации и разработаны программы их строительства. Совокупная установленная мощность ГЭС, рекомендованных к включению в региональные СТП, составит 4216,7 МВт с общей выработкой 12,71 млрд. кВт·ч электроэнергии. Освоение этих ресурсов позволит сократить дефицит электроэнергии в энергосистемах Северного Кавказа вдвое, до 29 % к 2020 г. и до 18% к 2030 г.

В 2013 г. ОАО “Институт Гидропроект” планирует разработать схему территориального планирования строительства объектов гидроэнергетики с созданием геоинформационной системы и 3D визуализацией основных сооружений перспективных гидроузлов. Полученные результаты будут использованы ОАО “РусГидро” для принятия инвестиционных решений по строительству ряда новых ГЭС на территории Северного Кавказа.



3D модель Канкунского гидроузла. Вид со стороны нижнего бьефа

## ОАО “Ленгидропроект”

Получено положительное заключение ФАУ “Главгосэкспертиза России” по разработанной ОАО “Ленгидропроект” проектной документации строительства Канкунской гидроэлектростанции на р. Тимптон. По заключению Главгосэкспертизы, разработанная проектная документация Канкунского гидроузла соответствует результатам инженерных изысканий, установленным требованиям законодательных актов и нормативных документов Российской Федерации. ФАУ “Главгосэкспертиза России” одобрены площадки размещения объектов, основные параметры будущего гидроузла, а также компоновка и конструктивные решения сооружений гидроузла. Установленная мощность Канкун-

ской ГЭС составит 1000 МВт при среднегодовой выработке 4,86 млрд. кВт·ч.

Канкунская ГЭС является первой из проектируемых гидроэлектростанций Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса, который включает четыре ГЭС на реках Учур и Тимптон. Ввод в эксплуатацию Канкунской ГЭС позволит создать стабильную и долгосрочную основу для развития крупного территориально-промышленного комплекса Северного региона России с улучшением качества жизни населения.

*Материалы подготовлены пресс-службой ОАО “РусГидро”:* И. Слива, Ю. Бессарабенко, В. Лебедева, В. Вишневская, А. Бутусова, И. Беликова, И. Егорова, Д. Воронова, П. Гельтищев, С. Дроздова

## Инновационные подходы к мировым вызовам

Именно так претенциозно называлась международная конференция “HYDRO 2012”, состоявшаяся 29 – 31 октября 2012 г. в Бильбао (Испания).

На открытии конференции после приветственных речей президента ICOLD г-на Адама Номбре, зам. директора Международного энергетического агентства г-на Ричарда Джонса, мэра г. Бильбао г-на Иньяки Азкуна и представителя Мирового банка г-на Жан-Мишеля Девернэй с анализом современного состояния и перспектив развития мировой гидроэнергетики выступила главный редактор и владелец журнала “Hydropower & Dams” и, по существу, главный инициатор и организатор конференции г-жа Алисон Бартль. Из ее доклада следует, что наибольшие достижения относятся к Азии (суммарная установленная мощность строящихся ГЭС составляет 110 000 МВт), где завершено строительство гидроузла “Три ущелья” с крупнейшей в мире ГЭС установленной мощностью 22 500 МВт, закончено строительство ГЭС Бакун мощностью 2400 МВт в Малайзии, ведется монтаж агрегатов на ГЭС Шон Ла (2400 МВт) во Вьетнаме и на Богучанской ГЭС (3000 МВт). Впечатляет интенсивность гидроэнергетического строительства в Китае, где строятся ГЭС суммарной мощностью 50000 МВт, во Вьетнаме (7000 МВт), в Иране (6000 МВт).

Следующим лидером гидроэнергетического строительства в мире является Латинская Америка, где мощность строящихся ГЭС превышает 33 000 МВт (в том числе 24 000 МВт в Бразилии); ГЭС мощностью 3000 МВт строятся в Эквадоре; ГЭС мощностью 1500 МВт строятся в Колумбии, Перу и Мексике.

Несколько скромнее показатели в Африке, где суммарная мощность строящихся ГЭС составляет около 14 000 МВт, и в Европе, где суммарная мощность строящихся ГЭС не достигает 10 000 МВт. Среди крупнейших в Европе можно назвать ГЭС Корс II в Австрии, Венда Нова в Португалии и Ла Муэла II в Испании.

Всего в четырех названных регионах (сведения о Северной Америке\* г-жой Алисон Бартль не приводились) строятся ГЭС суммарной установленной мощностью 167 000 МВт.

В конференции приняли участие более 1000 человек, представлявших 82 страны. Самые большие делегации насчитывали сто и более представителей: Франция (116), Испания (103) и Германия (87). Российская делегация (24) по численности заняла десятое место, 9 стран направили по одному делегату. Из стран СНГ крупнейшая после России делегация Украины насчитывала 4 человека, по два представителя направили Грузия и Азербайджан.

За три дня на 23 секциях и пяти подсекциях было заслушано 150 докладов, в том числе 28 на двух гидромеханических подсекциях (одна исследовательская, вторая проектная и эксплуатационная). Авторы трех заявленных российских докладов по этой тематике на конференцию не прибыли.

Второй по количеству докладов была группа секций, посвященных гидроаккумуляции (ГАЭС — новые возможности, ГАЭС — примеры и ГАЭС — дискуссионные вопросы).

На трех экологических подсекциях: рыбозащита (4 доклада), природозащитные и социальные аспекты (6 докладов) и управление экологическими воздействиями (7 докладов) — рассматривались

разнообразные вопросы, такие, например, как влияния водохранилища “Три ущелья” на естественный нерест китайского осетра, оценка экологических воздействий ГЭС при ожидаемых изменениях климата или компенсация экологических и социальных последствий строительства ГЭС в бассейне Бразильской Амазонки.

Работа двух секций была посвящена проблемам развития малой энергетики. Отдельно рассматривались европейские примеры (Австрия, Италия, Греция и почему-то Канада) и опыт проектирования и строительства МГЭС в не европейских странах (Доминиканская Республика, Иран, Южная Африка, Индонезия и Таиланд). На этой секции был также заслушан доклад российского представителя Я. И. Бляшко “Строительство МГЭС на малых реках Прибайкалья”.

На секции “Энергия морей и взаимодействие возобновляемых источников” были заслушаны доклады о волновой электростанции Мутрику, о ТЭО приливной электростанции близ Антверпена и несколько сообщений о гибридных ветро-гидравлических установках.

Конференция “HYDRO 2012”, как и большая часть предшествующих, была прекрасно организована. В числе председателей и сопредседателей секций были известные специалисты и деятели мировой гидроэнергетики. В их числе следует назвать уже упомянутых президента ICOLD г-на Адама

Номбре и представителя Мирового банка г-на Жан-Мишеля Девернэй, а также генерального секретаря ICOLD г-на Мишеля де Виво; известного европейского эколога г-на Жана Пьера Шабала; технического директора проектного бюро “Трактель/Коин и Белье”, старейшего французского гидростроителя г-на Лемперьера, активно пропагандирующего приливные электростанции с ортогональными агрегатами (разработанными специалистами НИИЭС под руководством д. т. н. Б. Л. Историка); профессора Берга, почетного президента ICOLD, и австрийского проектировщика профессора и менеджера Бернарда Пеликана, в течение шести лет (2004 – 2010) возглавлявшего Международную ассоциацию малой гидроэнергетики.

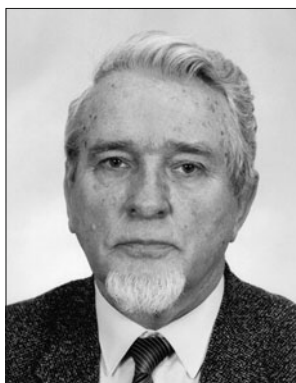
Одновременно с конференцией традиционно проводилась международная выставка промышленных продуктов и услуг. В числе почти 140 участников выставки такие известные фирмы, как “Alstom”, “Andritz Hydro”, “Hydroplus”, “Iberdrola”, “Indar Electric”, “Voith Hydro”; Россию представляли “Энергомашэкспорт”, “Силовые машины” и “Scope Hydro”.

После завершения конференции делегаты приняли участие в технической экскурсии на первую в мире коммерческую волновую электростанцию Мутрику в портовом городке, расположенном в Бискайском заливе между гг. Бильбао и Сан Себастьян.

Асарин А. Е., доктор техн. наук  
(ОАО “Институт Гидропроект”)

## Памяти Виктора Дорофеевича Костюкова

14 января 2013 г. ушел из жизни один из ведущих специалистов России в области морского портостроения, член-корреспондент Академии наук РФ и Академии транспорта РФ, член секции Комитета по ленинским и государственным премиям СССР в области науки и техники при Совете Министров СССР, член советской национальной секции постоянной Международной ассоциации конгрессов по судоходству (ПАМКС), вице-председатель ПАМКС для развивающихся стран в области судоходства, член Совета по транспорту стран СЭВ, член специализированного совета МИСИ им. Куйбышева, член научно-технического совета Минтрансстроя, зам. председателя экспертного совета ВАК РФ, профессор, доктор технических наук Виктор Дорофеевич Костюков.



В. Д. Костюков в 1958 г. окончил Одесский институт инженеров морского флота по специальности “Гидротехническое строительство морских портов и водных путей” и всю свою трудовую жизнь связал с гидротехническим строительством. С 1960 по 1977 г. работал в Одесском филиале Союзморниипроекта – Черноморниипроекте. С 1977 г. возглавил Союзморниипроект, занимался разработками, связанными со строительством портовых сооружений на слабых основаниях и надежностью портовых гидротехнических сооружений. Под руководством В. Д. Костюкова спроектированы и вве-

дены в эксплуатацию причальные сооружения в таких крупнейших портах России, как Владивосток, Восточный, Калининград, Новороссийск, Туапсе и др. В 1988 г. Виктор Дорофеевич возглавил кафедру водных путей и портов в Московской государственной академии водного транспорта.

В 1985 г. при непосредственном участии В. Д. Костюкова впервые в нашей стране были разработаны положения по расчету портовых гидротехнических сооружений на надежность.

В. Д. Костюков посвятил свою жизнь науке, написал более 200 печатных трудов, монографий, учебных пособий, имеет патенты и авторские свидетельства на изобретения. Результаты его научных трудов получили широкое распространение как в отечественной, так и в зарубежной практике. Заслуги В. Д. Костюкова отмечены многочисленными государственными и ведомственными наградами. В. Д. Костюков является почетным работником морского флота, почетным работником речного флота, почетным работником транспорта РФ.

Жизненный путь Виктора Дорофеевича Костюкова – пример беззаветного служения Родине, гидротехнике, идеалам добра и справедливости.

Светлая память о Викторе Дорофеевиче Костюкове навсегда сохранится в сердцах его родных, друзей, коллег и соратников.

---

Сдано в набор 24.12.2012. Подписано в печать 13.02.2013. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8,5. Цена свободная

---

Оригинал-макет выполнен в издательстве “Фолиум”  
127238, Москва, Дмитровское ш. 58, тел/факс (495) 482-5590, 482-5544

**Internet:** <http://www.folium.ru>, **E-mail:** [info@folium.ru](mailto:info@folium.ru)

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”

---



# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Статью в редакцию журнала “Гидротехническое строительство” можно направить по адресу: 109044, г. Москва, Воронцовский переулок, дом 2, стр. 1. ЗАО НТФ «Энергопрогресс» или по E-mail: gts1930@yandex.ru

Статья должна отвечать следующим требованиям.

1. Статью необходимо сопроводить письмом с указанием *сведений об авторах* (фамилия, имя и отчество полностью, место работы, ученая степень и должность, служебный и домашний адреса, номера домашнего и служебного телефонов), *краткой аннотацией*.

2. Принимаются к рассмотрению: статьи, напечатанные *на машинке* (на одной стороне листа через два интервала с полями 3 – 4 см), в двух экземплярах или один экземпляр распечатки статьи, набранной *на компьютере* (шрифт не менее 14 пт с полуторным межстрочным интервалом), плюс электронная версия статьи на диске (3,5" или CD) или по E-mail.

3. *Рисунки* представляются отдельно в двух экземплярах, их нельзя вклеивать в текст. В тексте (на полях) приводятся лишь ссылки на номера рисунков. Следует учитывать, что при печати рисунки уменьшаются, поэтому детали их не должны быть мелкими, однако размер каждого рисунка не должен превышать 200 × 290 мм.

Все *чертежи* выполняются в соответствии с действующими стандартами, аккуратно и четко. *Графики* должны быть выполнены в координатах в единицах измерения СИ (обязательных). Графики или кривые зависимости, если их на рисунке несколько, а также отдельные детали на чертежах, узлы и линии на схемах следует обозначать цифрами (позициями) или буквенными обозначениями. Сокращение слов не допускается.

*Фотоснимки* с четким контрастным изображением и хорошо проработанными деталями представляются в двух экземплярах, на одном из которых не должно быть никаких надписей и позиций.

4. *Формулы* должны быть четко написаны в отдельные строки (а не в текст). При этом прописные (большие) буквы подчеркиваются двумя черточками снизу, а строчные (маленькие) – двумя черточками сверху. Греческие буквы обводятся красным карандашом, латинские – синим. Индексы пишутся ниже строки, показатели степени – выше. На полях рукописи делаются пометки, поясняющие, какие буквы являются русскими, какие – латинскими, делается разметка букв [на полях или рядом пишется слово “буква” О, З, Ч, I (латинская), П, Ш, У в отличие от цифр 0, 3, 4, I, II Ш, V] в типах оборудования и других случаях. Если формулы набраны на компьютере, но их элементы имеют двойное прочтение, они должны быть размечены так же, как и при написании вручную.

5. *Таблицы* не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов (за исключением единиц измерения). Численные значения величин в таблицах и в тексте должны быть в единицах измерения СИ (обязательных).

6. Статья должна завершаться *конкретными выводами*, в которых в лаконичной форме (по пунктам) излагаются результаты работы и предложения автора, вытекающие из изложенного материала.

7. *Список литературы* приводится в конце статьи. Он составляется в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу в тексте заключаются в квадратные скобки. В списке указывается:

а) для *журнальных статей* – фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том);

б) для *книг* – фамилия и инициалы всех авторов, название книги, издательства, год издания;

в) для *сборников и продолжающихся изданий* – фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск;

г) для *других видов изданий* перечисляются идентичные библиографические данные.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы служебного пользования, а также мало распространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим или подобным ему способом.

*Технические требования к электронной версии статьи.* Текст статьи должен быть набран на PC-совместимом компьютере (не Mac) с использованием базовых шрифтов Windows. Рисунки необходимо выполнить в форматах EPS, CDR, BMP, TIFF или JPEG и предоставить отдельными файлами (нельзя заверстывать рисунки в текст статьи). Сканирование графических рисунков нужно производить с разрешением 600 dpi, а фотоснимков, представляемых в электронном виде, – с разрешением не менее 300 dpi.

## СПРАВКА

(предоставляется в редакцию каждым автором/соавтором статьи)

В соответствии с Законом Российской Федерации об авторских правах, сообщаю, что  
я, \_\_\_\_\_

автор (соавтор) статьи \_\_\_\_\_

уведомлён об ответственности за использование в статье таких материалов, защищённых авторским правом, как цитаты, воспроизведённые данные, иллюстрации и иные материалы, и о том, что ответственность за нарушение авторских прав ложится на автора статьи.

Я сообщаю, что данная статья не опубликована и не представлена для опубликования в другие периодические издания.

В связи с тем, что издательство “Springer” издаёт новый журнал на английском языке “Power Technology and Engineering”, статьи для которого будут отбираться из журналов “Электрические станции” и “Гидротехническое строительство”, я подтверждаю передачу прав издательству “Springer” на перевод статьи на английский язык и опубликование в печатном и электронном виде названной статьи в журнале “Power Technology and Engineering”, а также распространение её во всех странах мира в случае, если статья будет выбрана для печати в этом издании, и сообщаю, что такая передача указанных прав не нарушает авторских прав других лиц и организаций.

Подпись автора \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_ г.

**Ф.И.О.** \_\_\_\_\_

**Адрес** \_\_\_\_\_

**Место работы** \_\_\_\_\_

**Тел.** \_\_\_\_\_

**Факс** \_\_\_\_\_

**E-mail**, который может быть размещён в свободном доступе на сайте журнала для общения читателя с автором статьи \_\_\_\_\_

**E-mail** для переписки с редакцией \_\_\_\_\_