



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.

№ 7

ИЮЛЬ

2013

Содержание

Проектирование, строительство, эксплуатация

Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Альжанов Р. Ш., Громько П. В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС. 2

Расчеты, исследования, эксперименты

Назаров Н. Н. О “второстепенных” процессах переформирования берегов камских водохранилищ 8

Боровков В. С., Воинов М. А. Условия взвешивания турбулентным потоком частиц крупнозернистого руслового грунта. 12

Бухарцев В. Н., Нгуен Тхай Хоанг Влияние формы поверхности обрушения на меру запаса устойчивости грунтовых массивов 17

Онищенко Д. В. Применение углеродных многослойных нанотрубок в качестве функциональных сорбентов и аккумулялирования водорода. 21

Дискуссии

Тетельмин В. В. Решение задачи прогиба земной коры как возможного фактора воздействия на поведение плотины Саяно-Шушенской ГЭС 26

Рецензии на статью В. В. Тетельмина “Решение задачи прогиба земной коры как возможного фактора воздействия на поведение плотины Саяно-Шушенской ГЭС”.

Марчук А. Н. Рецензия 1 31

Шуйфер М. И. Рецензия 2 32

Храпков А. А., Воронков О. К. Рецензия 3 33

Вульфович Н. А. Рецензия 4 35

Савич А. И., Речицкий В. В. О влиянии Саяно-Шушенской ГЭС на геодинамические процессы в земной коре 39

Поздравление И. В. Семенову 49

Поздравление В. М. Лятхеру 50

Хроника

Новости гидроэнергетики и гидротехники 51

На обложке – Нижегородская ГЭС

Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Селезнев В. С., доктор геол.-мин. наук (ГС СО РАН), Лисейкин А. В., кандидат геол.-мин. наук (ГС СО РАН), Альжанов Р. Ш., заместитель председателя Правления – главный инженер ОАО “РусГидро”, Громыко П. В., геофизик (СФ ГС СО РАН)

Анализируются сейсмические колебания, излучаемые гидроагрегатами Саяно-Шушенской ГЭС.

Ключевые слова: Саяно-Шушенская ГЭС, гидроагрегаты старого и нового типа, сейсмические наблюдения, частоты, амплитуды колебаний, вибрационное состояние, режимы нагрузок.

Авария на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (СШГЭС) в 2009 г. вывела из строя десять гидроагрегатов. Для восстановления ГЭС до 2015 г. планируется установить десять гидроагрегатов современной конструкции (той же мощности, что и старые, но с улучшенными характеристиками в области надёжности и безопасности). На данный момент было отремонтировано четыре гидроагрегата старого типа — № 3, 4, 5 и 6, а также протестированы и запущены гидроагрегаты нового типа — № 1, 7, 8 и 9. На фоне этих преобразований важно выяснить влияние работы гидроагрегатов на колебания тела плотины и здания машинного зала СШГЭС.

Данное исследование посвящено оценке вибрационного состояния гидроагрегатов старой и новой конструкций, а также сравнению параметров динамических воздействий, возникающих вследствие их работы при различных режимах нагрузок, на арочно-гравитационную плотину и конструкции здания СШГЭС.

Для решения вышеуказанных задач произведен анализ зарегистрированных сейсмических колебаний, полученных в различных пунктах наблюдения в теле плотины и в машинном зале, для каждого из исследуемых гидроагрегатов (рис. 1). Запись сейсмических сигналов проводилась в непрерывном режиме и включала регистрацию колебаний как во время работы соответствующего гидроагрегата с различными нагрузками, так и при остановленном гидроагрегате.

Для анализа сейсмических записей в ГС СО РАН разработана технология инженерно-сейсмологического мониторинга, позволяющая вместе с методом стоячих волн по сейсмическим записям выделять источник колебаний определенной частоты, отслеживать изменения амплитуд его колебаний с течением времени и изучать взаимодействие мощного оборудования с окружающими его конструкциями и сооружениями [1, 2, 3]. Для первоначального анализа зарегистрированных сейсмограмм ис-

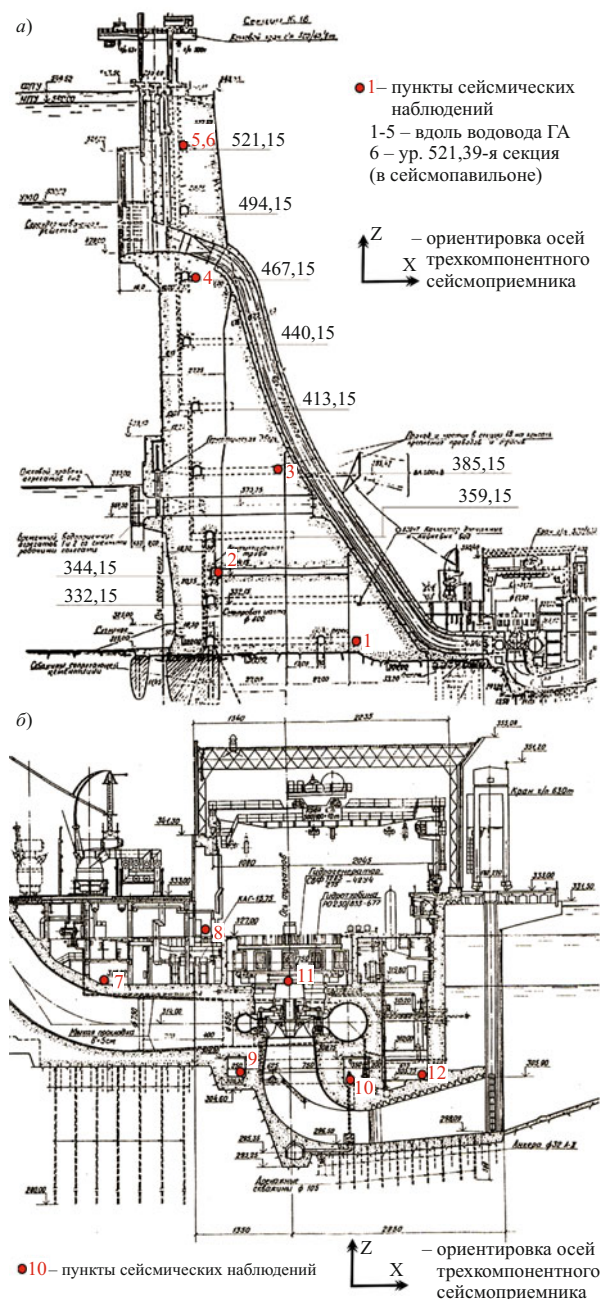


Рис. 1. Схема сейсмических наблюдений на Саяно-Шушенской ГЭС: а — тело плотины; б — машинный зал

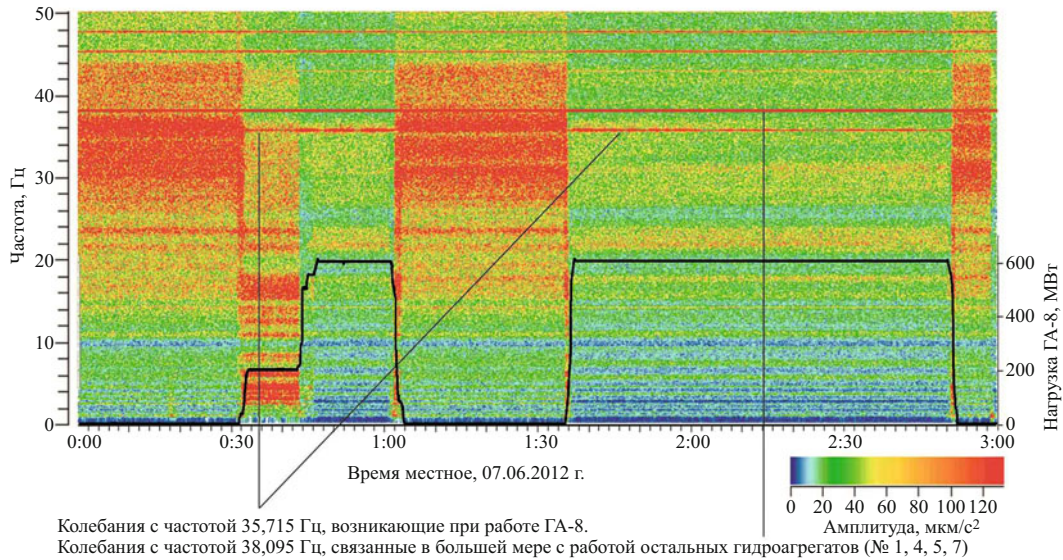


Рис. 2. Текущий спектр сейсмической записи, полученной при проведении тестовых испытаний 8-го гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС 07.06.2012 г.: *a* — режимы работы ГА-8; *b* — текущий спектр

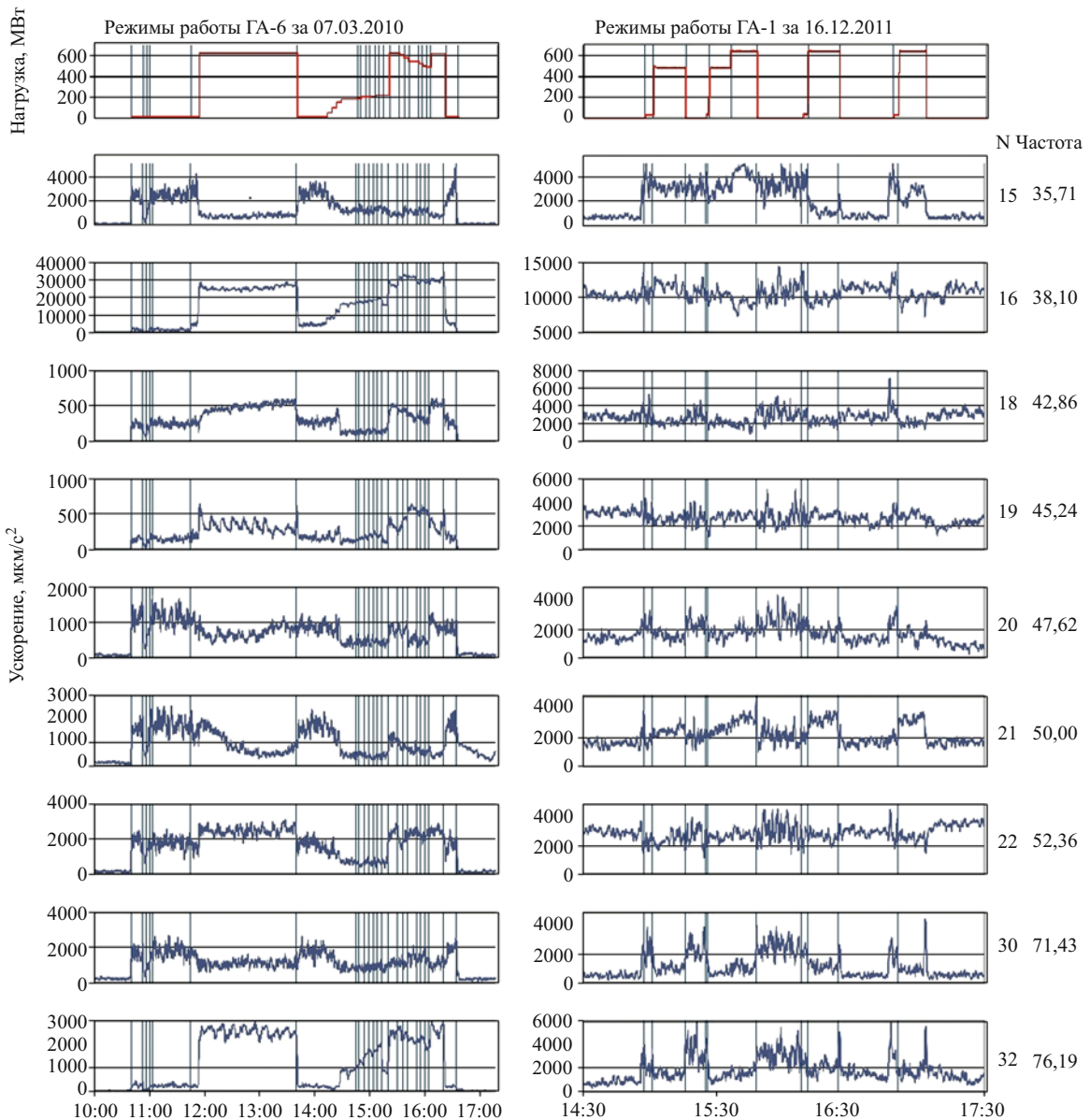


Рис. 3. Графики изменения амплитуд колебаний на частотах, кратных частоте вращения гидроагрегатов (N 2,38 Гц), построенные по сейсмическим записям, зарегистрированным в точке 8

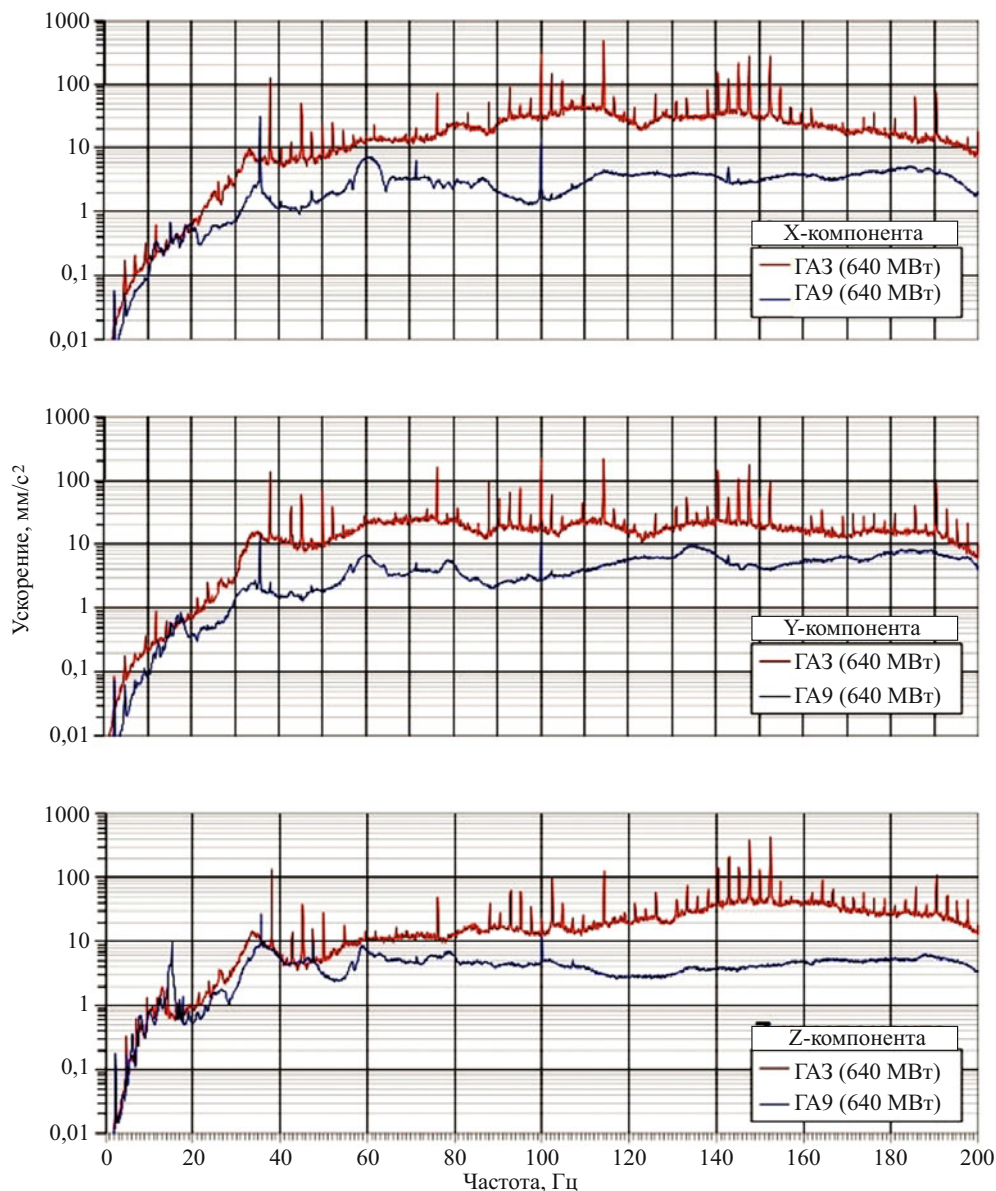


Рис. 4. Амплитудные спектры сейсмических колебаний, зарегистрированных на крышке турбины ГА-9 (новой конструкции) и ГА-3 (старой конструкции)

пользуется методика построения текущих спектров (или спектрограмм). Принцип построения текущих спектров следующий: по сейсмической записи скользят временным окном, для каждого положения которого рассчитывается амплитудный спектр. Множество таких спектров образуют двумерное изображение, по одной координате которого откладывается текущее время, по другой — частота. Амплитудам спектров соответствует цветная шкала, большие амплитуды отображаются более яркими цветами (например, красными), а низкие — более темными (например, синими). Текущий спектр позволяет на качественном уровне определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для выполнения количественных оценок предложена методика построе-

ния графиков изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах $A_{\omega}(t)$ по формуле:

$$A_{\omega}(t) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|$$

где $f(\tau)$ — зарегистрированный сейсмический сигнал, мкм/с^2 ; ω — частота, для которой строится график; Гц ; t — текущее время, с ; T — интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае $T = 10 \text{ с}$); $|\dots|$ — модуль комплексного числа.

Анализ текущих спектров и графиков изменения амплитуд на частотах, кратных частоте вращения гидроагрегата, показал, что зарегистрированный сигнал коррелирует с изменением нагрузки на

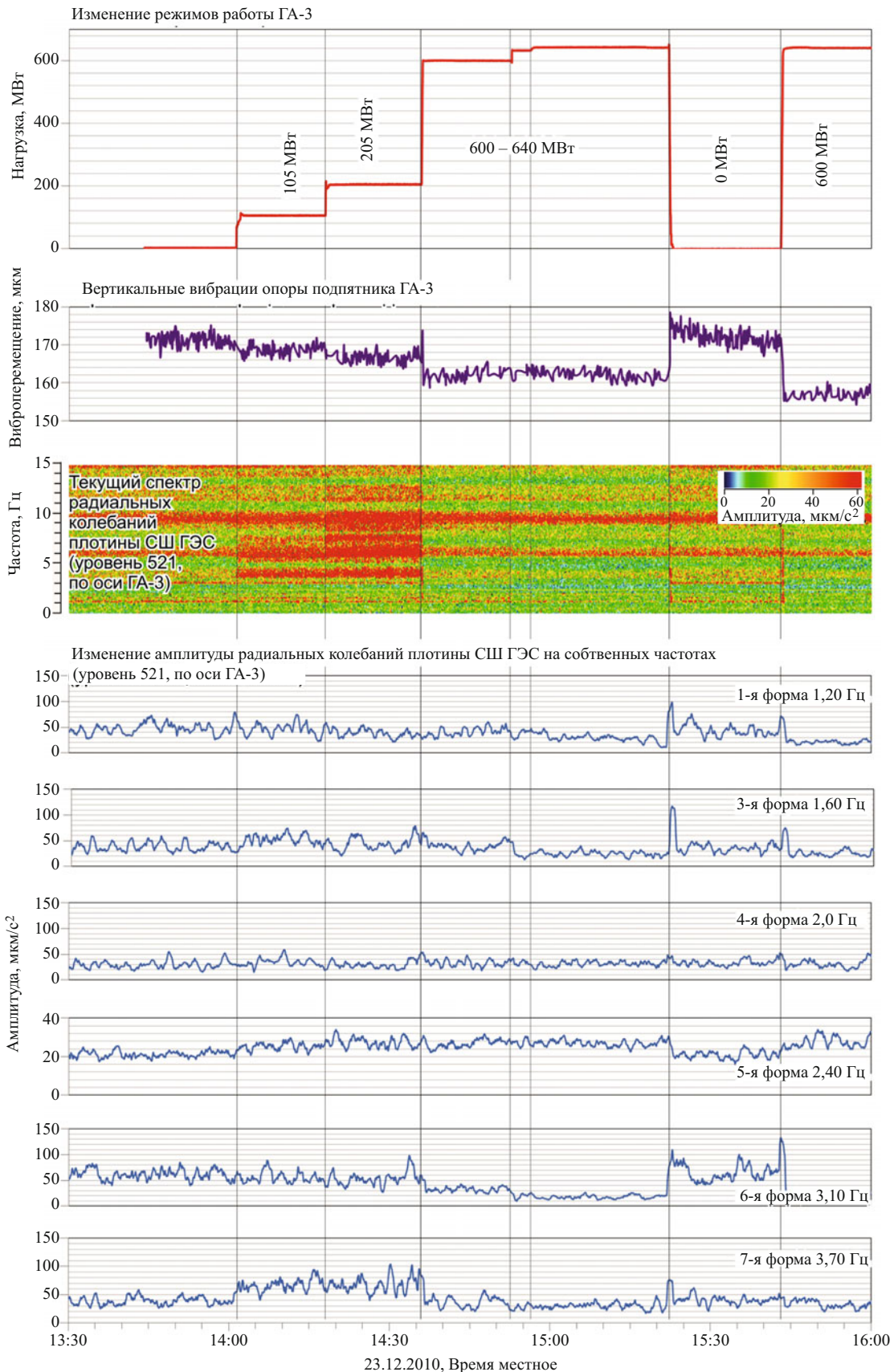


Рис. 5. Графики изменения амплитуд собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при проведении тестовых испытаний гидроагрегата № 3 (старого типа) в точке 5

гидроагрегате и имеет наибольшие в среднем амплитуды на частотах 35,715 и 38,095 Гц (рис. 2). Эти частоты кратны оборотной частоте гидроагре-

гатов и являются “лопастными” частотами гидроагрегатов с 15 и 16-ю лопастями для новой и старой конструкции соответственно.

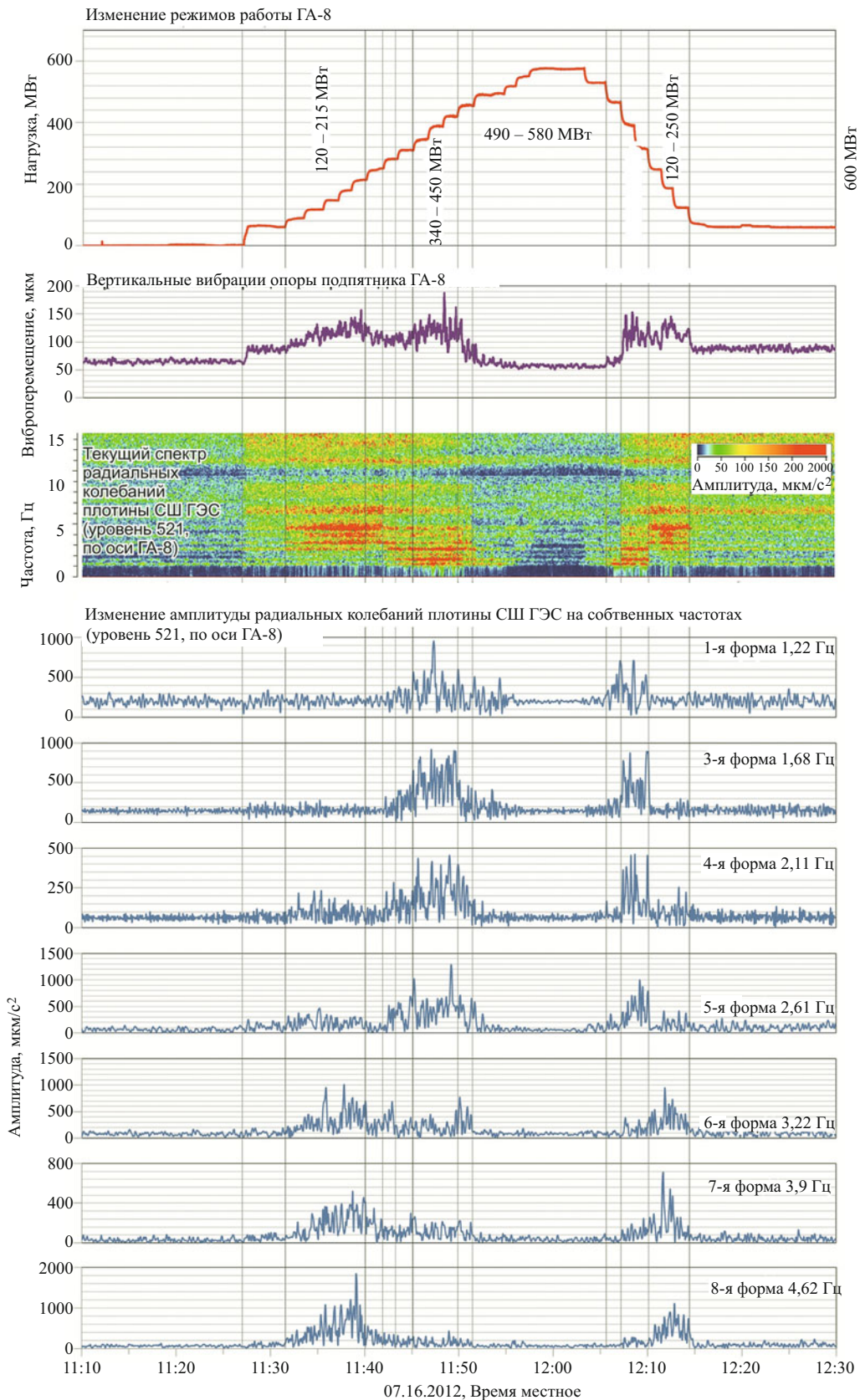


Рис. 6. Графики изменения амплитуд собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при проведении тестовых испытаний гидроагрегата № 8 (нового типа) в точке 5

Анализ динамических воздействий от работы гидроагрегатов на конструкции машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС показал следующее. Максимальные значения амплитуд колебаний на лопа-

стной частоте (38,095 Гц) гидроагрегата № 6 (старой конструкции) достигались при максимальной нагрузке и составляли около 30 тыс. мкм/с² (рис. 3). При работе гидроагрегата № 1 (новой конструкции)

максимальные значения на лопастной частоте (35,715 Гц) составляли до 5 тыс. мкм/с². Таким образом, максимальные амплитуды колебаний, связанные с работой гидроагрегатов нового типа (на лопастной частоте), регистрируемые в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС, в целом в 6 раз ниже, чем колебания, излучаемые гидроагрегатами старой конструкции.

На рис. 4 выполнена сравнительная оценка вибрационного состояния гидроагрегатов старой и новой конструкции (№ 3 и № 9 соответственно): представлены амплитудные спектры, построенные по записям сейсмических колебаний на крышках турбин соответствующих гидроагрегатов при нагрузке 640 МВт. Видно, что амплитуды колебаний, зарегистрированных при работе ГА-9 на частотах до 35 Гц, в среднем немного меньше, чем при работе ГА-3, но при частотах от 35 Гц и выше значения амплитуд в целом на порядок ниже, чем у ГА-3. Это может свидетельствовать о том, что вибрационное состояние гидроагрегата нового типа (№ 9) на высоких нагрузках лучше, чем состояние агрегатов старого типа (№ 3).

В рамках исследования проведен анализ низкочастотной части спектров колебаний (до 5 Гц), где выделяется набор частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Эти частоты являются резонансными, и возможные увеличения амплитуд колебаний на них являются наиболее опасными для конструкции плотины. Анализ показал, что максимальные значения амплитуд радиальных (по течению) собственных колебаний плотины, вызванных работой гидроагрегатов старого типа, составляют 100 – 130 мкм/с². Таким образом, при работе гидроагрегатов старого типа не наблюдалось значительных увеличений собственных колебаний плотины, учитывая что значение фоновых колебаний плотины, когда гидроагрегат не работал, около 50 мкм/с² (рис. 5).

У гидроагрегатов нового типа, напротив, существуют режимы нагрузок, при которых амплитуды собственных колебаний значительно увеличиваются. В качестве примера дано сравнение показаний датчика системы виброконтроля, установленного на опоре подпятника (вертикальная компонента), с показаниями датчика, установленного в верхней части плотины на отметке 521 по оси ГА-8, во время его работы на различных режимах (рис. 6). Наибольшие значения виброперемещений и амплитуды собственных колебаний для ГА-8 наблюдаются при нагрузках 120 – 250 и 315 – 450 МВт. При нагрузках 120 – 250 МВт наблюдается увеличение значений виброперемещения (до 150 мкм) и амплитуд колебаний на частотах 3,22, 3,90 и 4,62 Гц, соответ-

ствующих 6, 7, 8-й формам собственных колебаний плотины СШГЭС (до 1000 – 1800 мкм/с²). При нагрузках ГА-8 315 – 450 МВт амплитуды колебаний 6, 7, 8-й форм в целом понижаются, но значительно увеличиваются амплитуды колебаний на частотах 1,22; 1,68; 2,11 и 2,61 Гц, соответствующих 1, 3, 4, 5-й формам колебаний (до 800 – 1300 мкм/с²). При этом также наблюдается увеличение значения виброперемещения (до 190 мкм). При нагрузках ГА-8 выше 450 МВт амплитуды как виброперемещений, так и собственных колебаний плотины снижаются и при нагрузках 490 – 580 МВт принимают значения, сопоставимые с теми, которые наблюдались, когда ГА-8 не был нагружен. Можно заключить, что существуют интервалы режимов работы гидроагрегата, при которых происходит значительное (10 – 20 кратное) увеличение амплитуд собственных колебаний плотины, и эти интервалы коррелируют с интервалами, при которых наблюдаются повышенные амплитуды виброперемещений по показаниям системы виброконтроля. Аналогичные результаты получены при анализе динамических воздействий от работы других гидроагрегатов новой конструкции (№ 1, 7, 9).

Выводы

1. Максимальные амплитуды колебаний, регистрируемые в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС от работы гидроагрегатов новой конструкции, в 6 раз ниже, чем колебания, излучаемые гидроагрегатами старой конструкции.

2. На определенных режимах работы гидроагрегатов новой конструкции отмечается связь с ГТС Саяно-Шушенской ГЭС, приводящая к увеличению собственных колебаний плотины, не наблюдавшаяся при работе гидроагрегатов старой конструкции.

3. При создании на ГТС гидроэлектростанции систем сейсмометрического контроля необходимо учитывать контроль динамических воздействий, оказывающих влияние на систему “плотина — основание” от работающего оборудования.

Список литературы

1. Еманов А. Ф., Селезнёв В. С., Бах А. А., Гриценко С. А., Данилов И. А., Кузьменко А. П., Сабуров В. С., Татьков Г. И. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. 2002. № 2. С. 192 – 207.
2. Селезнев В. С. Симфония катастроф // Наука из первых рук. 2010. № 3. С. 35 – 37.
3. Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Брыксин А. А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и / или сооружений и устройство для его осуществления // Пат. 2461847; RU; МКИ G01V1 / 28 (2006.01), G01M7 / 02 (2006.01); № 2010128394 / 28, заявл. 08.07.2010, опубл. 20.09.2012.

О “второстепенных” процессах переформирования берегов камских водохранилищ

Назаров Н. Н., доктор геогр. наук (Пермский государственный национальный исследовательский университет)

На поверхностях отмелей в результате морозного выветривания образуются глубокие (до 40 см) трещины, которые постепенно расширяются под действием дефляции. Торфяной остров, закрепившийся у пересыпи залива в с. Висим (левобережье в наиболее широкой части Камского водохранилища), остановил потоки вдольбереговых наносов и стимулировал развитие широкого пляжа и береговой террасы. На берегах камских водоемов тоннельная эрозия активно развивается внутри блоков отседания, обвальных и оползневых телах, прислонившихся к береговому уступу. Диаметр тоннелей в устьевой части может достигать 1,5 м, а длина — 3–4 м и более. Наивысшая плотность эрозионных тоннелей (10–15 шт. на 100 м береговой линии) фиксируется у абразионно-обвальных и абразионно-оползневых типов берегов, представленных делювиальными суглинками. Слой песка, удаляемый дефляцией с поверхности склона при сухой ветреной погоде, может достигать 5–7 см (период наблюдений составлял 3–5 суток).

Ключевые слова: Камские водохранилища, переформирование берегов, выветривание, аккумуляция, заблочивание, всплывание торфяников.

По прошествии многих десятков лет после начала функционирования крупных водохранилищ на территории России и республик бывшего Советского Союза на большинстве водоемов так и не произошло снижения темпов переработки берегов и стабилизации геодинамической обстановки.

До настоящего времени острота социальных проблем продолжает оставаться дестабилизирующим фактором устойчивого развития небольших населенных пунктов, расположенных в береговой зоне водохранилищ.

Изучение геодинамики берегов и ложа камских водохранилищ в последние годы проходит под знаком расширения и детализации исследований. Научный задел, созданный исследователями в 50–70-е гг. прошлого столетия, сегодня требует своего пополнения и обновления с учетом современного состояния и возможностей науки.

По уровню изученности темпов и направленности современных береговых и глубоководных геолого-геоморфологических процессов камские водохранилища заметно отличаются от многих крупных равнинных водоемов России и смежных государств. С конца 1990-х гг. опубликован целый ряд работ, посвященных детальному анализу абразии [1, 2, 3], оползнеобразования [4, 5], овражной эрозии [5], накопления илов [6, 7, 8], формирования и аккумуляции наносов [9, 10, 11], развития берегового карста [12, 13]. Значительно меньше внимания уделялось освещению деятельности других (“второстепенных”) геоморфологических процессов, тем не менее вносящих значительную долю в интегральный процесс переформирования берегов. Многие из этих процессов, действуя в качестве самостоятельного агента денудации или аккумуляции, вносили и продолжают вносить весомый

вклад в преобразование берегов, на первый взгляд не относящихся к категории проблемных.

Картирование берегов, относящихся к различным типам переформирования, показало, что более 65 % периметра береговой линии на Камском и около 47 % на Воткинском водохранилищах представлено низкими песчано-глинистыми или торфянистыми берегами. Пологонаклонные, часто заболоченные побережья поймы, первой и второй надпойменных террас не испытывают абразионного воздействия — не обваливаются, не осыпаются, не подвергаются оползнеобразованию, не расчленяются оврагами. Морфологические и морфометрические изменения рельефа таких берегов для наблюдателя происходят значительно незаметнее по сравнению с берегами, где абразия и оползнеобразование служат главными источниками их разрушения.

Как было установлено в процессе детальных инструментальных исследований, проведенных на камских водоемах в последние годы [5], основными процессами, осуществляющими моделировку низких берегов, являются гидратационное выветривание, аккумуляция минерального или органического вещества и заболочивание. Сравнительное дешифрирование аэрофотоснимков разных лет залетов показало, что местоположение береговой линии даже на таких участках по истечении нескольких десятилетий обычно оказывается смещенным в сторону акватории или берега.

Используемые в ранних работах [14] объяснения движущих сил морфолитогенеза берегов, не имеющих прямых признаков переработки (пологий берег без признаков разрушения и аккумуляции с наличием почвы и растительности), сегодня не могут считаться достаточными для понимания пер-



Рис. 1. Снижение высоты берега на 80 – 90 см фиксируется по оголившемуся корневищу сосны (Воткинское водохранилище, 2008 г.)

спектив дальнейшего развития подобных береговых комплексов.

Физико-химическое (гидратационное) выветривание является первым этапом миграции вещества (по схеме Е. В. Шанцера [15]), мобилизующим его к переносу преимущественно по вертикали без существенного горизонтального смещения [16]. Действуя одновременно с физическим выветриванием и фитогенным разрушением гидратационное выветривание содействует удалению части минерального и органического вещества даже без явного вмешательства агентов денудации. В результате подтопления грунтов и периодического затопления низких берегов при сохранении сплошности почвенно-растительного покрова происходит “усадка” поверхности прибрежной полосы и, как следствие, направленное смещение линии берега в сторону материковой части. Доказательством геоморфологической значимости этого процесса являются многочисленные примеры оголившихся корней деревьев и пней, местоположением корневой шейки фиксирующих уровень первичной поверхности берега до создания водоема (рис. 1).

Одним из процессов, не изученным с той степенью детальности, которой он заслуживает в соответствии с вносимым им вкладом в переформирование прибрежных отмелей, является физическое выветривание. Обычно все рассуждения, касающиеся подготовки пород к денудации этим процессом, относятся к надводным элементам склона, и эта составляющая переработки береговых уступов уже получила должное освещение в литературе [17]. Разрушение же поверхностей прибрежных от-



Рис. 2. Плавающий остров остановил потоки вдольбереговых наносов и стимулировал развитие широкого пляжа и береговой террасы

мелей в результате возникновения трещин, образованных физическим выветриванием, остается практически неисследованным [18].

Находясь в осушенном состоянии в наиболее активные в плане проявления процесса сезоны года (ранняя весна и поздняя осень – периоды неоднократного перехода температуры воздуха через 0°), горные породы прибрежной отмели также подвергаются разрушению. Наиболее рельефно процесс протекает в породах, представленных плотными малопластичными аллювиальными глинами и суглинками. На осушенных поверхностях отмелей в результате морозного выветривания образуются глубокие (до 40 см) трещины, которые, постепенно расширяясь под действием дефляции, а в последствии и прибойных потоков, приобретают самые причудливые формы.

Как уже было отмечено выше, значительная часть периметра побережий камских водохранилищ представлена низкими песчано-глинистыми или торфянистыми берегами. Весьма небольшое превышение суши над уровнем водохранилища привело к масштабному заболачиванию обширных прибрежных территорий. Суммарная площадь заболоченных земель на побережьях только Камского водохранилища в настоящее время достигает 600 км², причем 80 % из них приходится на его левобережье. На правом берегу заболачиванию подвержены преимущественно берега крупных заливов. Поскольку большинство заболоченных земель покрыто лесными массивами, то здесь наблюдаются угнетение и постепенное отмирание древесной растительности, на смену которой приходит кустарниковая и травянистая растительность, активно протекает торфообразование.

В результате переформирования берегов, сложенных торфом, береговая линия приобрела сложную (изрезанную) конфигурацию. Ее преобразование происходит путем всплывания торфяников, об-



Рис. 3. Тоннель в суглинках (район с. Усть-Гаревая, Камское водохранилище, 2004 г.)

разования плавающих островов и их последующим разрушением [19, 20]. В других случаях при значительной зимней сработке уровня ледовый покров, опускаясь на дно, смерзается с торфом и в период быстрого весеннего наполнения отрывает торфяной чехол.

Участки, наиболее благоприятные для всплывания торфяников, размещаются в северной части левобережья Камского водохранилища, а также в устьях рек Обвы, Косьвы и Иньвы. По истечении полувека после создания Камского водохранилища случаи всплывания или отрыва от берегов торфяных островов стали относительно редкими.

Кроме локального воздействия на морфогенез заболоченных берегов процесс отрыва торфяных островов может оказывать и побочный геоморфологический эффект в моделировке берегов. Крупный плавающий остров, соединившись с берегом, может коренным образом изменить скорость и направленность его формирования. Такой остров, закрепившись у пересыпи залива в с. Висим (левобережье в наиболее широкой части Камского водохранилища) в 2009 г., остановил потоки вдольбереговых наносов и стимулировал развитие широкого пляжа в подножии берегового уступа. Заполнение наносами входящего угла привело к ослаблению абразионного разрушения берега на южном участке и прекращению размыва на северном (рис. 2).

Суффозия — один из процессов, который с трудом поддается количественному учету, хотя и играет большую роль в формировании современного



Рис. 4. Сдуваемый с поверхности берегового уступа песок заполняет неровности и трещины прибрежной зоны (район с. Нижний Лух, Камское водохранилище, 2008 г.)

нано- и микрорельефа прибрежной зоны водохранилищ. Расположение суффозионных просадок и других отрицательных форм берегового рельефа определяется геологическими и гидрогеологическими условиями прибрежной зоны. На оползневых телах суффозионные формы располагаются преимущественно в районе тыловых швов запрокинутых блоков. В других случаях местоположение просадок определяется локальной трещиноватостью горных пород. Довольно часто просадки (чаще в форме воронки) тяготеют к бровкам речных террас, участкам наибольшей концентрации трещин разгрузки.

Совершенно не изученной с геоморфологических позиций, но служащей одним из основных катализаторов подготовки берегового уступа к очередному циклу разрушений является тоннельная эрозия — процесс расширения и углубления трещин талыми, дождевыми и подземными водами [21 – 25].

На берегах камских водоемов тоннельная эрозия развивается преимущественно внутри блоков отседания, обвальных и оползневых телах, прислонившихся к береговому уступу и поэтому какое-то время защищающих его от непосредственного воздействия водоемных процессов. Создаваемые тоннельной эрозией формы микрорельефа напоминают абразионные ниши и по этой причине довольно часто исследователями береговых процессов принимаются за формы, образовавшиеся в результате волнового воздействия. Основными их морфологическими отличиями от абразионных ниш являются округлость (эллипсоидность) выходов тоннелей и их узость по отношению к длине “трубы”. Диаметр тоннелей в устьевой части может достигать 1,5 м при длине 3 – 4 м и более (рис. 3).

Образование тоннелей обычно происходит в периоды массового поступления атмосферных или грунтовых вод в открытые или закрытые трещины берегового уступа. В случаях выхода устьев этих

форм на уровень уреза воды обработку стенок тоннелей совершают прибойные потоки и волны.

Наивысшая плотность эрозионных тоннелей (10 – 15 шт. на 100 м береговой линии) обычно фиксируется у абразионно-обвальных и абразионно-оползневых типов берегов, представленных делювиальными суглинками, а также в уступах цокольных террас, верхняя часть которых сложена песками. В последнем случае устья тоннелей располагаются на линии контакта рыхлых и более плотных (водонепроницаемых) отложений. В местах концентрации таких образований часто отмечаются самые высокие скорости переформирования абразионного уступа.

Эоловые (дефляционно-аккумулятивные) процессы на берегах камских водохранилищ обычно развиваются лишь в периоды сухой погоды и преимущественно в весенний период, когда скорости ветра часто достигают 8 – 10 м/с и более.

Наиболее “продуктивно” деятельность ветра проявляется в пределах второй и в меньшей степени третьей надпойменных террас р. Камы, сложенных в основном мелко- и среднезернистыми песками. При фронтальном расположении берегового уступа к направлению ветра песок с его плоскости сначала забрасывается на горизонтальную поверхность террасы и далее в результате резкого усиления скорости ветра на 30 – 40 % (результат сгущения линий тока) разносится на десятки метров от бровки берега (рис. 4). Слой песка, удаляемый дефляцией с поверхности склона при сухой ветреной погоде, может достигать 5 – 7 см (период наблюдения составлял 3 – 5 суток).

На поверхности самой террасы, на удалении от бровки уступа до 30 м, высота микроформ или плащеобразного залегания эолового материала за весенне-летний сезон в отдельные годы может достигать 15 – 25 см (обычно 3 – 5 см). Следы переотложенного ветром песка часто фиксируются на значительно большем расстоянии — до 120 – 150 м. Прошлогдняя травянистая растительность в прибрежной зоне в отдельные годы местами бывает почти полностью погребена эоловыми отложениями.

На периодически обнажающихся ранней весной прибрежных отмелях перевевание песков и алевритов — это обычный процесс их моделировки в условиях осушки. Мощность накопившегося материала на локальных участках в отдельные годы составляла 25 – 40 см, что сопоставимо с темпами аккумуляции наносов в водной обстановке.

Таким образом, представленные в статье результаты изучения экзодинамической активности и направленности “второстепенных” геодинамических процессов показывают, что геоморфологический эффект их воздействия на берега крупных равнинных водохранилищ достаточно велик и требует учета при проведении прогнозных и проектировочных расчетов. Кроме того, данные процессы могут

служить и служат не только катализатором активности ведущих рельефообразующих процессов, но и являться главным источником и причиной их преобразования.

Список литературы

1. Назаров Н. Н. Экзогенные геологические процессы как источник формирования донных отложений Воткинского водохранилища // Гидротехническое строительство. 2002. № 10. С. 50 – 53.
2. Назаров Н. Н. Географическое изучение берегов и акваторий камских водохранилищ // Географический вестник. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2006. № 2. С. 18 – 36.
3. Назаров Н. Н. Переработка берегов равнинных водохранилищ России на современной стадии развития (конец XX в. — начало XXI в.) // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 12 – 19.
4. Назаров Н. Н., Калинин В. Г., Пьянков С. В., Симиренков С. А., Тюняткин Д. Г. Изучение оползневой деятельности на берегах Камского водохранилища с применением ГИС-технологий // Геоморфология. 2004. № 4. С. 55 – 62.
5. Назаров Н. Н. Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края. — Пермь: ЗАО “Полиграфкомплект”, 2008. 151 с.
6. Назаров Н. Н., Меньшикова Е. А. Современное осадкоформирование в глубоководной зоне камских водохранилищ // Географический вестник. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. № 2. С. 21 – 25.
7. Назаров Н. Н., Сунцов А. В. Геохимические горизонты и микроэлементный состав донных отложений Воткинского водохранилища // Географический вестник. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. № 2. С. 26 – 36.
8. Назаров Н. Н., Сунцов А. В. Морфолитогенез приплотинного участка Воткинского водохранилища // Геоморфология. 2008. № 4. С. 91 – 101.
9. Назаров Н. Н., Анисимов В. М., Калинин В. Г., Симиренков С. А., Тюняткин Д. Г. Динамика наносов на прибрежных отмелях камских водохранилищ // Перенос наносов в эрозионно-русловых системах. — М.: МГУ, 2004. С. 140 – 143.
10. Назаров Н. Н. Формирование аквальных геосистем Воткинского водохранилища // Изв. РГО. 2005. Т. 137. Вып. 3. С. 52 – 61.
11. Назаров Н. Н., Тюняткин Д. Г., Черепанов А. В. Некоторые результаты изучения формирования и транзита наносов в прибрежной зоне Камского водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2007. Т. 2. С. 163 – 167.
12. Назаров Н. Н. Особенности накопления и свойства иловых отложений на участках распространения гипсовых берегов Камского водохранилища // Географический вестник. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. № 1. С. 77 – 87.
13. Назаров Н. Н., Фролова И. В. Особенности морфолитогенеза карстовых берегов Камского водохранилища // Геоморфология. 2009. № 4. С. 92 – 99.
14. Печеркин И. А., Печеркин А. И., Каченов В. Н. Теоретические основы прогнозирования экзогенных геологических процессов на берегах водохранилищ. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1980. 85 с.
15. Шанцер Е. В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. — М.: Наука, 1966. 112 с.
16. Выркин В. Б. Современное экзогенное рельефообразование котловин байкальского типа: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Иркутск, 1994. 44 с.
17. Печеркин И. А. Геодинамика побережий камских водохранилищ. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1969. Т. 2. 308 с.

18. Назаров Н. Н. Экзогенный морфолитогенез зоны сезонной осушки камских водохранилищ // Геоморфология. 2010. № 4. С. 72 – 80.
19. Матарзин Ю. М. Всплытие торфяников и плавающие острова на Камском водохранилище // География Пермской области. 1966. Вып. 3. С. 103 – 117.
20. Матарзин Ю. М. Гидрология водохранилищ. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2003. 296 с.
21. Батыр В. В. К вопросу о подкапывающей (суффозионной) деятельности талых и ливневых вод на территории Среднего Поволжья // Уч. зап. Казан. ун-та. 1953. Т. 113. Кн. 2. С. 65 – 76.
22. Шукин И. С. Общая геоморфология. — М.: МГУ, 1960. Т. 1. 615 с.
23. Löffler E. Piping and pseudokarst features in the tropical lowlands of New Guinea // Erdkunde. 1974. № 1. P. 13 – 18.
24. Parker G. Piping, a geomorphic agent in landform development of the drylands // Publ. internat. hydrol. scient. 1964. № 65. P. 103 – 113.
25. Дедков А. П., Мозжерин В. Н., Ступишин А. В., Трофимов А. М. Климатическая геоморфология денудационных равнин. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1977. 224 с.

Условия взвешивания турбулентным потоком частиц крупнозернистого руслового грунта

Боровков В. С., доктор техн. наук (МГСУ),
Волынов М. А., кандидат техн. наук (ВНИИГиМ)

Рассмотрена подъемная сила, возникающая вследствие несимметричного обтекания водным потоком частиц верхнего слоя донного грунта. С учетом веса частиц и архимедовой силы получен критерий взвешивания, согласующийся с опытными данными в широком диапазоне крупности частиц от 1 до 300 мм. Критерий имеет простую структуру и обнаруживает хорошую сходимость с формулами отечественных и зарубежных исследователей.

Ключевые слова: турбулентный поток, русло, русловой грунт, условия взвешивания частиц грунта

Взвешивание частиц русловых грунтов водным потоком является одним из определяющих факторов руслового процесса. Однако до настоящего времени не сложилось единого мнения о факторах, приводящих к взвешиванию частиц руслового грунта турбулентным водным потоком. Среди влияющих факторов называются турбулентные пульсации скоростей и придонного давления, количественный анализ которых затруднен. Традиционная точка зрения, связывающая размыв донного грунта с предельной влекущей силой трения, увлекающей частицы, не представляется физически оправданной, поскольку продольное воздействие на частицы не может привести к их вертикальной подвижке и взвешиванию. Процесс взвешивания частиц крупнозернистого руслового грунта существенным образом зависит от физико-механических характеристик донного грунта и гидравлических параметров турбулентного водного потока [1, 2].

Согласно данным ситового анализа, диаметр шара, эквивалентного частице по объему, в среднем составляет 0,93 от среднего диаметра граничных сит. При данном соотношении, если принять диаметр шара равным среднему диаметру сит, получим соотношение объемов, равное 0,8. Поверхность реальных частиц песка при этом больше поверхности равнообъемного шара в среднем в 1,34 раза.

Рассмотрим особенности взвешивания реальных частиц речного аллювия. Коэффициент сопротивления песчаных и других частиц аллювиального происхождения заметно превышает коэффициент

сопротивления шара. Так, в зоне автомодельности по числу Рейнольдса он составляет в среднем 1,10 – 1,15, что более чем вдвое превышает $C_{Dш} = 0,47$.

При рассмотрении условий предельной устойчивости частиц на дне потока примем во внимание возможное отклонение вершин от их среднего уровня (рис. 1) на величину $d_{\max} - d_{\text{ср}}$ вследствие различной их ориентации при укладке. Очевидно, что наименее устойчивы к взвешиванию сильно выступающие частицы, поскольку их вершины более удалены от средней линии дна $0 - 0$ и находятся под воздействием заметно больших скоростей, чем средние частицы [3].

Согласно данным В. Н. Гончарова, максимальный размер частицы в среднем на 35 % превосходит диаметр эквивалентного шара, поэтому для расчета скорости обтекания выступающих частиц следует принять

$$z_{\text{в}} = \frac{d}{2} + (d_{\max} - d) = 0,85d. \quad (1)$$

При шероховатом режиме обтекания осредненная скорость на вершинах выступающих частиц $u_{\text{кв}}$ равна

$$\frac{u_{\text{кв}}}{u_*} = 5,751g \frac{z_{\text{в}}}{d} + 8,48 = 5,751g0,85 + 8,48 = 8,08 \quad (2)$$

где u_* — динамическая скорость.

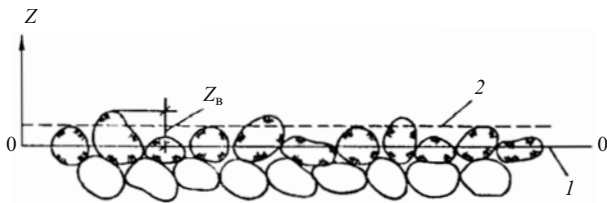


Рис. 1. Схема расположения частиц в поверхностном слое:
1 — средняя линия дна; 2 — $d_{cp}/2$

Очевидно, начальное взвешивание выступающих частиц будет происходить в периоды действия наибольших продольных пульсаций скорости.

Данные многочисленных измерений показывают, что стандарт продольных пульсаций вблизи стенки близок в среднем к $2,7u^*$. Учитывая известную близость закона распределения вероятностей пульсаций скорости к нормальному, можно считать, что наибольшая 3-сигмовая пульсация составит $8,1u^*$ и близка по модулю к значению осредненной скорости ($\pm u_{кв}$). Это подтверждают также результаты тщательно выполненных измерений А. Б. Клавена и З. Д. Копалиани [4].

Таким образом, можно считать, что начальное взвешивание выступающих частиц происходит в моменты действия наибольших пульсаций скорости, при которых мгновенное значение скорости достигает $2\bar{u}_{кв}$.

Баланс сил в состоянии предельного равновесия максимально выступающих частиц в проекции на вертикальную ось с заменой веса частицы в воде силой сопротивления при её осаждении запишется в виде

$$C_D \rho \frac{W^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} = C_n \rho \frac{(2\bar{u}_{кв})^2}{2} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3)$$

где C_D , C_n — соответственно коэффициент гидродинамического сопротивления и подъемной силы; W — гидравлическая крупность.

Из (3) находим

$$\frac{\bar{u}_{кв}}{W} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_D}{C_n}}. \quad (4)$$

Принимая для песчаных частиц $C_D = 1,1$ и $C_n = 0,18$ [5], условие предельного равновесия запишем в виде

$$\frac{\bar{u}_{кв}}{W} = 1,23. \quad (5)$$

Однако следует иметь в виду, что эта запись лишь формальное следствие того, что подъемная

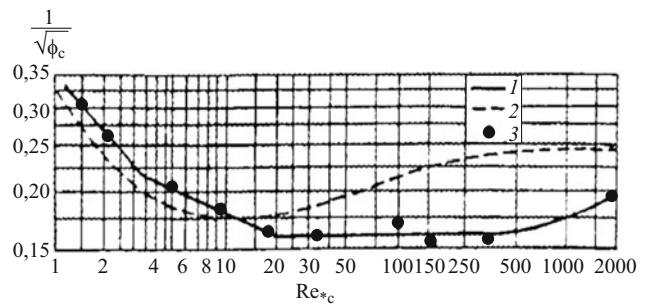


Рис. 2. Условие предельного равновесия частиц:

1 — по В. С. Кнорозу [16]; 2 — по А. Шилдсу [11]; 3 — центры тяжести экспериментальных точек В. С. Кнороза

сила, взвешивающая частицу, формируется в моменты действия наибольших продольных пульсаций скорости, создающих вместе с осредненной актуальной скоростью, модуль которой равен $2\bar{u}_{кв}$.

Учитывая, что $\bar{u}_{кв} = 1,2\bar{u}_к$, где $\bar{u}_к$ на вершине среднего выступа шероховатости (при $z = d/2$) условие предельного равновесия можно представить в иной, также формальной записи, удобной для использования:

$$\frac{\bar{u}_{кв}}{W} = 1,025 \approx 1, \quad (6)$$

где $u_{кв}$ — критическая скорость на вершине среднего выступа шероховатости.

Таким образом, хотя полученное условие устойчивости реальных частиц в потоке при формальной кинематической записи оказалось совпадающим с условием устойчивости шарообразных частиц, следует иметь в виду, что физически начальное взвешивание определяется подъемной силой, возникающей при обтекании выступающих частиц с актуальной скоростью $2\bar{u}_{кв}$ (при $\frac{\bar{u}_{кв}}{W} = 1,23$).

Гидравлическая крупность частицы W определяется в общем случае весом частицы в воде, ее размером, формой и зависит от вязкости жидкости. Анализ многочисленных экспериментальных данных, приведенных В. Н. Гончаровым [6], показал, что для крупных частиц величина W может определяться по зависимости

$$W = 33,1 \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho}} d = \sqrt{\frac{2g}{1,75} \frac{\rho_T - \rho}{\rho}} d. \quad (7)$$

Для песчаных частиц, учитывая, что $\frac{\rho_T - \rho}{\rho}$ в среднем близко к 1,65 (ρ_T — плотность частицы) с погрешностью, не превышающей 3 %, можно записать

$$W = \sqrt{2gd} . \quad (8)$$

Используем зависимость (8) для оценки устойчивости речных песчаных грунтов к размыву при их крупности, превышающей 0,2 – 0,3 мм, так как начиная от этих диаметров частиц расчет по этой формуле не выходит за пределы разброса экспериментальных данных, приведенных В. Н. Гончаровым [6]. Следует отметить, что условия предельной устойчивости (6) и (8) соответствуют весьма редкому “точечному” взвешиванию отдельных выступающих частиц грунта в пределах “пятен активности” потока, в пределах которых возникают 3-сигмовые пульсации скорости, вероятность их появления составляет 0,3 % [7]. Экспериментально зафиксированные условия предельного равновесия частиц могут в некоторой степени отличаться от этих условий в зависимости от того, какая степень подвижки зерен допускалась в режиме предельного равновесия. Так, по данным М. Альбертсона, Д. Саймонса, Е. Ричардсона [8] условие отсутствия подвижки зерен грунта записывается в виде

$$\frac{gd}{u_*^2} > 12,9, \quad (9)$$

которое может быть также записано как

$$\frac{\bar{u}_{\text{кс}}}{W} = 1,33, \quad (10)$$

что не сильно отличается от полученного выше условия $\frac{\bar{u}_{\text{кс}}}{W} = 1$.

Эти расхождения связаны, видимо, с различной вероятностью взвешивания частиц грунта. Для проверки полученного условия взвешивания в виде (6) проведена обработка данных Ц. Е. Мирцхулавы [9] по размывающим скоростям для несвязных грунтов.

Методика обработки опытных данных заключалась в следующем:

1. Контрольный расчет производился для глубины $h = 1$ м.
2. Определялась принадлежность каждого режима к квадратичной зоне сопротивления по условию $\frac{V_{\text{кр}}d}{\nu} > 500$ [10].
3. Определялся коэффициент гидравлического сопротивления λ по формуле И. Никурадзе

Расчет предельного равновесия частиц речного русла

d , см	$V_{\text{кр}}$, см/с	W , см/с	$d/4h$	$Re = 4V_{\text{кр}}h/\nu \cdot 10^6$	λ	u_{*c} , см/с	$\frac{u_*cd}{\nu}$	$\bar{u}_{\text{кс}}$	$\frac{\bar{u}_{\text{кс}}}{W}$
0,10	55,0	10,6	0,000250	2,20	0,0142	2,32	23,2	10,47	0,990
0,20	70,0	19,0	0,000500	2,80	0,0166	3,19	63,8	17,90	0,940
0,25	75,0	21,0	0,000625	3,00	0,0176	3,52	88,0	20,98	1,000
0,30	80,0	23,2	0,000750	3,20	0,0183	3,82	114,6	23,87	1,030
0,50	96,0	30,0	0,001250	3,84	0,0206	4,87	243,5	32,90	1,096
1,00	123,0	42,5	0,002500	4,92	0,0249	6,86	686,0	46,30	1,090
1,50	142,0	52,0	0,003750	5,68	0,0279	8,38	1257,0	56,60	1,087
2,00	155,0	60,2	0,005000	6,20	0,0304	9,55	1910,0	64,50	1,070
2,50	165,0	67,2	0,006250	6,60	0,0325	10,51	2627,5	70,94	1,055
3,00	176,0	73,6	0,007500	7,04	0,0344	11,47	3441,0	77,40	1,050
4,00	193,0	85,0	0,010000	7,72	0,0379	13,28	5312,0	89,60	1,050
7,50	235,0	116,4	0,018750	9,87	0,0475	18,10	13575,0	122,20	1,050
10,00	254,0	134,3	0,025000	10,20	0,0530	20,66	20660,0	139,50	1,038
15,00	284,0	164,6	0,037500	11,36	0,0628	25,15	37725,0	169,80	1,031
20,00	303,0	190,0	0,050000	12,12	0,0715	28,59	57180,0	193,00	1,015
30,00	332,0	232,0	0,075000	13,28	0,0871	34,62	103860,0	233,7	1,010

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{2h}{k_S} + 1,74, \quad (11)$$

исходя из условия $k_S = d$ (где k_S — крупность зерен песочной шероховатости), поскольку при начале размыва русловые формы отсутствуют.

4. Определялась величина критического значения динамической скорости $u_{*c} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8}} V_{кр}$.

5. Устанавливалась величина $\bar{u}_{кc} = 6,75u_{*c}$.

Результаты расчета по опытным данным Ц. Е. Мирцхулава [9] приведены в таблице.

Произведенная таким образом обработка показала, что отношение $\frac{u_{кc}}{W}$ для частиц речного аллювия, крупность которых изменяется от 0,1 до 300 мм, сохраняется практически постоянным в условиях квадратичного режима сопротивления для русловых грунтов любой крупности.

Поскольку в равнинных условиях динамические скорости не превосходят 2–5 см/с, частицы мелкозернистого донного грунта крупностью 0,2–0,5 мм находятся в пределах вязкого подслоя и обтекаются без отрыва потока [11]. Определим условие предельного равновесия шарообразных частиц при обтекании их вязким потоком. Расчет подъемной силы методом численного интегрирования с учетом линейного распределения скоростей дает следующее динамическое условие предельного равновесия:

$$0,47\rho \frac{u_{кc}^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} = (\rho_T - \rho) \frac{\pi d^3}{6}, \quad (12)$$

которое приводится для шарообразных кварцевых частиц к виду

$$Fr_{кc} = \frac{u_{кc}^2}{gd} = 4,88. \quad (13)$$

Полученное условие предельного равновесия при вязком обтекании шарообразных кварцевых частиц в режиме гладкого сопротивления зернистой поверхности остается достаточно близким к полученным выше условиям предельного равновесия при шероховатом режиме сопротивления зернистой поверхности.

Имеющийся достоверный экспериментальный материал позволяет проверить полученные выше условия предельного равновесия. Так, согласно Б. И. Студеничкинову [12], критическая скорость определяется по соотношению

$$V_{кр} = 1,15\sqrt{gd} \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (14)$$

Это выражение с использованием формулы А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{d}{4h} \right)^{0,25} \quad (15)$$

преобразуется следующим образом:

$$\frac{V_{кр}}{\sqrt{gd}} = \frac{1,15}{4^{\frac{1}{4}}} \left(\frac{4h}{d} \right)^{\frac{1}{4}} = \frac{0,9}{\sqrt{\lambda}}, \quad (16)$$

$$\frac{u_{*c}}{\sqrt{gd}} \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0,9}{\sqrt{\lambda}}, \quad (17)$$

откуда при $u_{кc} = 6,75u_{*c}$, характерном для квадратичного закона сопротивления, получаем окончательно

$$\frac{\bar{u}_{кc}^2}{gd} = 4,6. \quad (18)$$

Учитывая, что $W^2 = 2gd$, условие предельного равновесия, по Б. И. Студеничкинову, можно привести к виду

$$\frac{\bar{u}_{кc}^2}{2gd} = 2,3 \quad (19)$$

или

$$\frac{\bar{u}_{кc}}{W} \approx 1,5. \quad (20)$$

Таким образом, можно заключить, что в разнородном экспериментальном материале, обработанном Б. И. Студеничкиновым, вероятность взвешивания зерен была несколько выше той, которая предполагается нашей расчетной схемой.

Согласно А. Шилдсу [11], условие предельного равновесия при “шероховатом” обтекании зернистого слоя можно записать

$$\frac{u_*^2}{gd \frac{\rho_T - \rho}{\rho}} = 0,057; \quad (21)$$

$$\frac{\bar{u}_{кc}^2}{gd} = 4,28. \quad (22)$$

Это условие предельного равновесия в кинематической форме записи имеет вид

$$\frac{\bar{u}_{\text{КС}}}{W} = 1,46. \quad (23)$$

Таким образом, данные Б. И. Студеничникова и А. Шилдса дают несколько более высокие значения критических скоростей по сравнению с осредненным массивом данных, сведенных в таблицу, что указывает на более высокую вероятность подвижки частиц, допущенную также и в опытах, обработанных А. Шилдсом. По оценке Б. Тейлора [13], кривая А. Шилдса отвечает расходу наносов $q_S = 0,01u_*d$.

По результатам анализа К. В. Гришанина [14] характер изменения данных В. С. Кнороза в координатах А. Шилдса заметно отличается от данных А. Шилдса в области квадратичного сопротивления (рис. 2). Если принять $1/\sqrt{\varphi_c} = 0,19$ (при наибольшем значении $\frac{u_*d}{\nu} = 2000$), то динамическое условие предельного равновесия частицы в квадратичном режиме сопротивления для опытов Кнороза можно записать в виде [15]

$$\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) \frac{gd}{u_*^2} = 26,3. \quad (24)$$

При $u_{\text{К}} = 6,75u_*$ для песчаных частиц получаем

$$\frac{\bar{u}_{\text{КС}}^2}{gd} = 2,85. \quad (25)$$

В кинематической форме записи это условие приобретает вид

$$\frac{\bar{u}_{\text{КС}}}{W} = 1,19, \quad (26)$$

и оно более близко, чем условия А. Шилдса и Б. И. Студеничникова, к установленному выше критерию предельного равновесия частиц грунта. Тем не менее, В. С. Кнороз указывает [16], что в качестве критических регистрировались параметры потока, соответствующие средним между началом подвижки частиц и их массовым влечением, т. е. вероятность взвешивания частиц в этих опытах была существенной. Это и объясняет причину того, что для опытов В. С. Кнороза кинематическое условие предельного равновесия частиц несколько больше 1.

Выводы

1. Рассмотрены силы, действующие на частицы крупнозернистого аллювиального руслового грунта. Установлено, что подъемная сила, действующая на частицы верхнего слоя донного грунта, связана с несимметричностью обтекания частиц и определяется скоростью вблизи вершин выступов зернистой шероховатости.

2. Получено условие взвешивания частиц донного руслового грунта, учитывающее влияние продольных турбулентных пульсаций скорости и различную окатанность зерен грунта.

3. Полученное условие взвешивания, подтвержденное данными отечественных и зарубежных исследователей для частиц крупностью от 1 до 300 мм, может быть использовано для прогнозирования русловых деформаций.

Список литературы

1. Великанов М. А. Русловой процесс. — М.: Физматгиз, 1958. 395 с.
2. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. — Л.: Гидрометеоздат, 1966. 232 с.
3. Роцупкин Д. В. Влияние ориентации разноокатанных частиц несвязных грунтов на величину размывающей их скорости // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. 1976. № 4. С. 117 – 121.
4. Клавен А. Б., Копалиани З. Д. Лабораторные исследования кинематической структуры турбулентных потоков с сильно шероховатым дном // Труды ГГИ. 1987. Вып. 209. С. 65 – 90.
5. Алкаева А. Б., Доненберг В. М., Квасова И. Г. Условия предельной устойчивости частиц несвязного грунта на дне турбулентного потока // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1978. Т. 126. С. 22 – 29.
6. Гончаров В. Н. Движение наносов. — М.: ОНТИ, 1938. 312 с.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев Е. В. Справочник по математике. — М.: Наука, 1964. 608 с.
8. Bogardy J. Sediment transport in alluvial streams. — Budapest: Akadkado, 1978. 823 p.
9. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. — М.: Колос, 1967. 177 с.
10. Альтикуль А. Д. Гидравлические сопротивления. — М.: Недра, 1982. 222 с.
11. Shields A. Ahnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung // Berlin Mitteilungen der Presseveesuchsanstalt fur wasserbau und schiffbau. 1936. N 26.
12. Студеничников Б. И. Размывающая способность потока и методы русловых расчетов. — М.: Госстройиздат, 1964. 184 с.
13. Vanoni V. A., Hwang Li-San. Relation between bed forms and friction in streams // J. Hydr. Div. Proc. AMCE. 1967. V. 93. P. 121 – 144.
14. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. 427 с.
15. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. 143 с.
16. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы её определяющие // Изв. ВНИИГ. 1958. Т. 59. С. 62 – 81.

Влияние формы поверхности обрушения на меру запаса устойчивости грунтовых массивов

Бухарцев В. Н., доктор техн. наук, Нгуен Тхай Хоанг, магистр (СПбГПУ)

Выполнен анализ влияния формы поверхности обрушения на меру запаса устойчивости однородного грунтового откоса. Рассмотрены три формы профиля гипотетической поверхности обрушения: окружность, парабола и профиль, описываемый полиномом третьей степени. Оценка устойчивости выполнена методом, в котором соблюдаются все законы механики.

Ключевые слова: форма поверхности обрушения, мера запаса устойчивости, однородный грунтовой массив.

При решении этой задачи выполняется оценка устойчивости грунтовых массивов расчетным методом [1], использующим критерий прочности Кулона — Мора. Этот критерий ограничивает касательные напряжения предельными значениями:

$$\tau \leq \tau_{\text{пр}} = f\sigma + c,$$

где $f = \operatorname{tg}\varphi$; c — параметры механической прочности грунта; σ — нормальное напряжение на площадках сдвигов в соответствующих точках грунтового массива.

Он также лимитирует напряжения и направления площадок сдвигов в точках пересечения профиля поверхности обрушения с профилем поверхности грунтового массива. Результаты исследования о влиянии граничных условий на оценку устойчивости грунтовых массивов изложены в работе [2]. Используемый расчетный метод — единственный на сегодня метод из рассматриваемой группы, в котором выполняются все законы механики с соблюдением критерия прочности Кулона — Мора.

Для конкретизации дальнейшего изложения рассмотрена оценка устойчивости этим методом однородного грунтового откоса, расчетная схема которого с произвольно намеченным профилем поверхности обрушения представлена на рис. 1.

Уравнения равновесия вертикального элемента тела обрушения шириной dx , высотой h и единичным размером в третьем измерении в выбранной системе координат имеют вид:

$$\Sigma X = 0: \quad q_x dx - dE + z' \sigma dx - \tau_k dx = 0; \quad (1)$$

$$\Sigma Z = 0: \quad q_z dx - dT - \sigma dx - z' \tau_k dx = 0; \quad (2)$$

$$\Sigma M = 0: \quad m dx - dM + z' E dx - T dx = 0. \quad (3)$$

где $q_x dx$, $q_z dx$ — компоненты равнодействующей поверхностной и объемной нагрузок; $m = q_x b$ — момент горизонтальной нагрузки интенсивностью q_x относительно середины подошвы элемента; E , T — компоненты сил взаимодействия между элементами, являющиеся равнодействующими соответственно нормальных и касательных напряжений, действующих на вертикальных гранях элемента; $M = Ea$ — момент силы E относительно подошвы элемента; $\tau_k = f_k \sigma + c_k$, σ — компоненты напряжения на поверхности обрушения, соответствующие предельному состоянию; $z = z(x)$ — функция, описывающая профиль поверхности обрушения; z' — производная от $z(x)$ по x на интервале $[x_0; x_n]$.

В эту систему уравнений предельного равновесия входят пять неизвестных функций: E , T , M , σ , z и числовой параметр — коэффициент запаса, поэтому задача статически неопределимая.

После интегрирования уравнений (1), (2), (3) в пределах от x_0 до x и соответствующего преобразования получаются выражения для вычисления сил взаимодействия и их момента в любом вертикальном сечении профиля тела обрушения:

$$E = E_0 + \int_{x_0}^x (q_x + z' \sigma - \tau_k) dx; \quad (4)$$

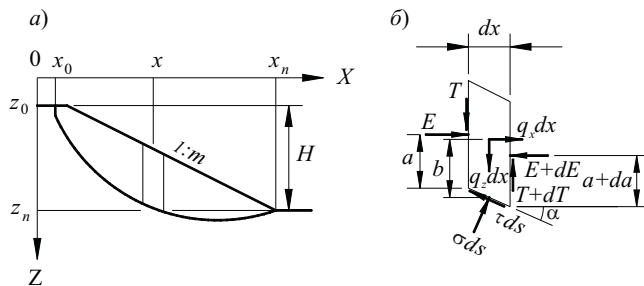


Рис. 1. Расчетная схема: а — профиль откоса и поверхность сдвигов; б — силы, действующие на выделенный элемент

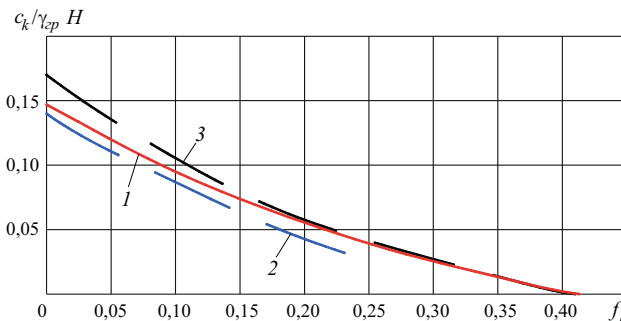


Рис. 2. Графики критических значений параметров прочности грунта для профиля поверхности обрушения: 1 — по выражению (11); 2 — по выражению (12); 3 — по выражению (13)

$$T = T_0 + \int_{x_0}^x (q_z - \sigma - z' \tau_k) dx; \quad (5)$$

$$M = M_0 + (z - z_0)E - (x - x_0)T + \int_{x_0}^x [m - (z - z_0)(q_x + z' \sigma - \tau_k) + (x - x_0)(q_z - \sigma - z' \tau_k)] dx. \quad (6)$$

Распространяя интегрирование на все тело обрушения от x_0 до x_n , получим систему уравнений равновесия тела обрушения в целом:

$$\int_{x_0}^{x_n} (\tau_k - z' \sigma) dx = Q_x + E_0 - E_n; \quad (7)$$

$$\int_{x_0}^{x_n} (\tau_k z' + \sigma) dx = Q_z + T_0 - T_n; \quad (8)$$

$$\int_{x_0}^{x_n} [(\tau_k z' + \sigma)(x - x_0) - (\tau_k - \sigma z')(z - z_0)] dx = M_Q + M_\Gamma, \quad (9)$$

где $Q_x = \int_{x_0}^{x_n} q_x dx$; $Q_z = \int_{x_0}^{x_n} q_z dx$; $M_Q = \int_{x_0}^{x_n} [m - (z - z_0)q_x + (x - x_0)q_z] dx$;

$M_\Gamma = (z_n - z_0)E_n - (x_n - x_0)T_n - (M_n - M_0)$.

Индексы при E , T , M означают принадлежность к начальному или конечному сечениям. Очевидно, для рассматриваемого откоса $E_0 = E_n = T_0 = T_n = 0$, $M_0 = M_n = 0$.

В правых частях уравнений (7), (8), (9) стоят величины, характеризующие активные силовые воздействия на грунтовой массив, в левых частях — величины, характеризующие реакции на эти воздействия.

Чтобы проинтегрировать эти дифференциальные уравнения, надо для снятия статической неопределенности определить функции σ и z . Для выполнения условий равновесия и граничных условий функция σ должна иметь четыре параметра. Наиболее просто эта задача решается, если эту функцию описать полиномом

$$\sigma = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3, \quad (10)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 — вещественные числовые коэффициенты; $X = (x - x_0)/(x_n - x_0)$.

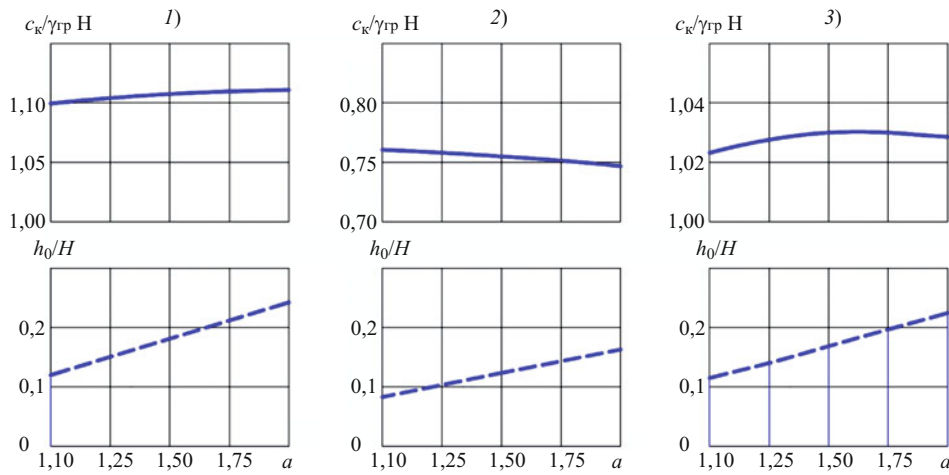


Рис. 3. Графики изменения относительных значений $c_k/\gamma_{гр}H$ (сплошные линии) и h_0/H (штриховые линии) на интервале значений $a \in [1; 2]$ при $f_k = 0,087$ для профилей поверхности обрушения с абсциссами крайних точек: 1 — $x_0 = 4$ м, $x_n = 20$ м; 2 — $x_0 = 4$ м, $x_n = 21$ м; 3 — $x_0 = 8$ м, $x_n = 20$ м

Значения двух коэффициентов, входящих в (10), определяются граничными условиями: при $x = x_0 \rightarrow X = 0, A_0 = \sigma_0$; при $x = x_n \rightarrow X = 1 A_1 = \sigma_n - \sigma_0 - A_2 - A_3$. После подстановки этих выражений в (10) получим

$$\sigma = \sigma_0 + (\sigma_n - \sigma_0)X - A_2X(1 - X) - A_3X(1 - X_2). \quad (10^*)$$

Значения коэффициентов A_2 и A_3 определяются из уравнений равновесия тела обрушения (7) и (8), значения σ_0 и σ_n определяются нагрузкой в крайних сечениях профиля тела обрушения.

В этих сечениях условие прочности Мора накладывает граничные условия также на функцию z' , площадки сдвигов в этих сечениях ориентированы по отношению к главным площадкам определенным и единственным образом. При горизонтальных главных площадках в крайних сечениях рассматриваемого профиля граничные условия для функции z' определяются выражениями:

$$z'(x_0) = z'_0 = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right), \quad z'(x_n) = z'_n = -\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Если поверхность обрушения выклинивается на откос, то в концевом сечении граничное условие принимает вид

$$z'(x_n) = z'_n = -\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \beta\right),$$

где $\beta = \operatorname{arctg}(1/m)$.

Таким образом, два параметра функции z , описывающей профиль поверхности обрушения, определяются граничными условиями.

Если профиль поверхности обрушения описывается окружностью, то ясно, что свободный параметр только один, а не три, как предполагается в распространенных методах. Лишний параметр определяется условием достижения минимума запаса устойчивости. Его значение проще всего находить, задаваясь положением крайней точки профиля поверхности обрушения.

Из третьего, не использованного пока уравнения предельного равновесия (9), определяется численное значение меры запаса устойчивости. Это может быть либо общий коэффициент запаса, либо критическое значение одного из параметров прочности f_k или c_k при задаваемом значении другого параметра. Последний прием позволяет построить график, определяющий критические значения параметров во всей области определения значений этих параметров.

На рис. 2 представлены графики, связывающие критические значения параметров прочности грунта откоса, представленного на рис. 1, при $\gamma_{гр} = 17$ кН/м³, $H = 10$ м и $m = 2$ для трех функций:

окружности

$$z = z_c + \sqrt{r^2 - (x - x_c)^2}, \quad (11)$$

где x_c, z_c, r — координаты центра и радиус окружности;
параболы

$$z = z_0 + \left[z'_0 X - \frac{z'_0 - z'_n}{2} X^2 \right] (x_n - x_0); \quad (12)$$

полинома третьей степени

$$z = z_0 + \left[z'_0 X + \left(3 \frac{z_n - z_0}{x_n - x_0} - 2z'_0 - z'_n \right) X^2 + \left(z'_0 + z'_n - 2 \frac{z_n - z_0}{x_n - x_0} \right) X^3 \right] (x_n - x_0). \quad (13)$$

Графики показывают, что окружность наиболее опасная форма профиля поверхности обрушения только для несвязных грунтов (для рассматриваемого примера при $f_k > 0,364$). Для связных грунтов (в остальной области определения значений f_k) наиболее опасная форма профиля поверхности обрушения по выражению (13). Парабола наименее опасная форма профиля поверхности обрушения из трех рассмотренных. Более того, она возможна не для всего диапазона значений f_k .

Результаты сопоставительных расчетов показывают, что из семейства поверхностей, выклинивающиеся на откос, минимальному запасу устойчивости соответствуют поверхности, выклинивающиеся у подошвы откоса.

При оценке устойчивости методом [1] предполагается, что поверхность обрушения начинается с вертикальной трещины, глубина которой h_0 ограничена интервалом [2]

$$\frac{c_k}{\gamma_{ep}} (\sqrt{1 + f_k^2} + f_k) \leq h_0 \leq \frac{2c_k}{\gamma_{ep}} (\sqrt{1 + f_k^2} + f_k). \quad (14)$$

Для удобства изложения представим (14) в виде

$$h_0 = a \frac{c_k}{\gamma_{ep}} (\sqrt{1 + f_k^2} + f_k), \quad (14^*)$$

где $a \in [1; 2]$ — числовой коэффициент.

Значение числового коэффициента a в выражении (14*) соответствует минимуму запаса устойчивости грунтового массива как экстремум или значение на границе интервала. На рис. 3 представлены возможные варианты определения h_0 для трех профилей поверхности обрушения при одном и том же значении $f_k = 0,087$.

Выводы

Выполненными исследованиями установлено, что принимаемая в расчетах форма поверхности обрушения оказывает влияние на результат оценки устойчивости, особенно существенно для связных грунтов. Это обстоятельство создает предпосылки для разработки расчетных методов по определению наиболее опасной формы поверхности обрушения на основе вариационных принципов.

Список литературы

1. Бухарцев В. Н. Оценка устойчивости грунтовых откосов вариационным методом // Гидротехническое строительство. 1998. № 11.
2. Бухарцев В. Н., Нгуен Тхай Хоанг. Учет граничных условий при оценке устойчивости грунтовых массивов // Гидротехническое строительство. 2013. № 1.

Применение углеродных многослойных нанотрубок в качестве функциональных сорбентов и аккумуляирования водорода

Онищенко Д. В., кандидат техн. наук (Дальневосточный федеральный университет)

Проведены комплексные исследования сорбционных свойств углеродных многослойных нанотрубок, сформированных в процессе механической активации аморфного углерода, полученного пиролизом сфагнома бурого. Представлена зависимость сорбционной емкости углеродных нанотрубок от времени их хранения, влияние технологических параметров формирования нанотрубок на их способность к окислительной модификации.

Ключевые слова: сфагнум бурый, пиролиз, механоактивация, аморфный углерод, углеродные многослойные нанотрубки (МУНТ), сорбционная емкость, функциональные сорбенты, аккумуляирование водорода.

В последние годы для очистки воды все более актуальное значение приобретают природные сорбенты естественного происхождения, такие как бентонитовые глины, цеолиты, шунгизиты и другие глинистые породы, которые обладают высокой сорбционной емкостью, катионообменными свойствами, низкой стоимостью и широкой доступностью [3, 11, 14]. Часто применяемыми сорбентами являются активные угли, которые позволяют удовлетворить постоянно возрастающие требования к качеству воды, как сбрасываемой в водоемы после очистки, так и питьевой.

Активные угли получают из разнообразного углеродосодержащего сырья в некарбонизованном виде или в форме углей и коксов. Основным сырьем для получения являются древесина, торф, каменные и бурые угли, производные нефтепродуктов [9, 14]. Среди перспективных видов сырья для получения активных углей следует отметить растительные ресурсы — отходы сельскохозяйственных культур и сфагновые виды мха, которые при пиролизе дают высокий выход углерода — 99,81 – 99,97 % [8 – 11].

Использование многослойных нанотрубок в качестве функциональных наноматериалов в различных областях науки и техники обусловлено их уникальными физико-химическими, технологическими и механическими свойствами. Интенсивные исследования вышеперечисленных свойств углеродных нанотрубок, а также связанные с этим прикладные разработки проводятся во многих странах мира. Интерес к этим работам обусловлен, с одной стороны, необычными физико-химическими свойствами углеродных нанотрубок, благодаря которым они являются привлекательным объектом фундаментальной науки, а с другой стороны — широкими перспективами прикладного использования [1, 4].

Ухудшающаяся обстановка в области экологии водных ресурсов, а также сточных производственных вод, в составе которых выявляется большое количество экологически неприемлемых веществ, требует принятия оперативных решений. В последние годы активно появляются работы [2, 16], в ко-

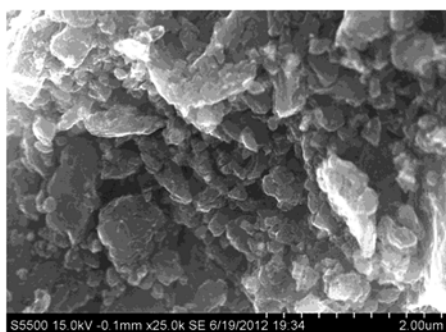
торых предлагается применять углеродные нанотрубки в качестве селективных сорбентов для концентрирования микропримесей металлов: серебра, меди, вольфрама, титана, марганца, никеля и др.

Углеродные многослойные нанотрубки являются также высокоэффективными аккумуляирующими и транспортными системами [5, 6], в частности для водорода — одного из наиболее аккумуляируемых и транспортируемых газов, который является экологически чистым энергоносителем. Водород может использоваться для создания конструкций с нулевой эмиссией, снабженных электрическими двигателями, работающими на водородных топливных элементах. Однако в настоящее время существует весомый недостаток в развитии водородной энергетики — это аккумуляирование и транспортировка водорода. Предлагаемые сегодня способы — гидридный, жидкостной, под высоким давлением, сорбционный при пониженных температурах — не удовлетворяют существующим требованиям, которые с каждым годом только ужесточаются. Деликатное хранение водорода на борту автомобилей, проблема, не решенная до сих пор, является предметом многих прикладных и фундаментальных исследований [7].

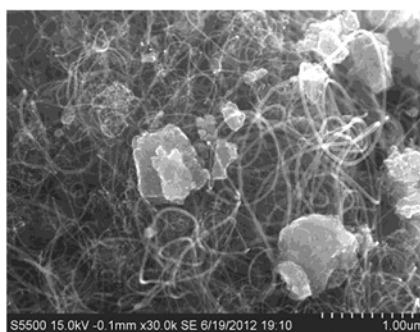
Ранее проведенные исследования [10, 11] позволили установить условия формирования углеродных многослойных нанотрубок в процессе механохимической обработки аморфного углерода, синтезированного из сфагнома бурого.

Целью настоящей работы являлось изучение взаимосвязи между параметрами формирования углеродных многослойных нанотрубок, условиями их дальнейшей модификации и сорбционными свойствами полученного продукта.

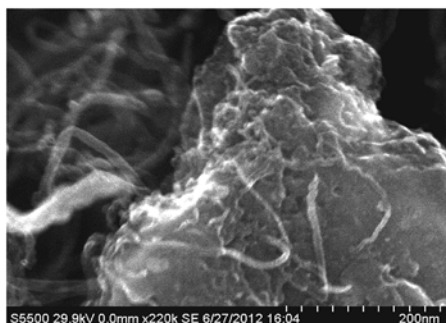
Экспериментальная часть. Углеродные многослойные нанотрубки были сформированы с помощью разработанной пиролитической и механохимической технологии [10 – 13]. В качестве исходного материала использовали мох сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum*). Сфагновый мох предварительно просушивался, просеивался для удаления избыточной влажности и инородных примесей, подвер-



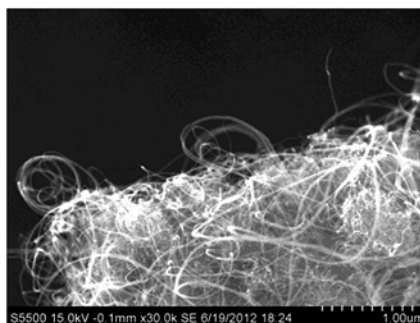
a



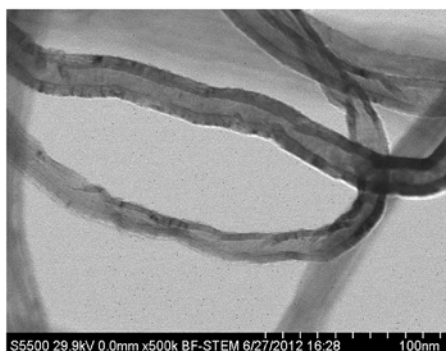
б



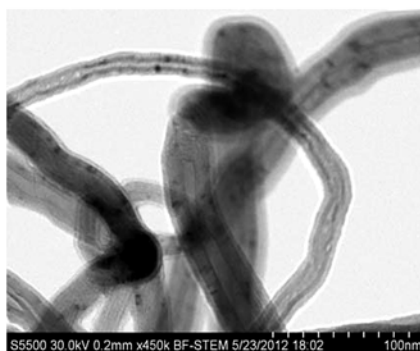
в



г



д



е

Пиролитическая модификация углерода из сфагнома бурого после механоактивации в течение, ч: *a* — 6; *б, в* — 8; *г, д* — 10; *е* — 27 (*a, б, в, г* — СЭМ изображение; *д, е* — ПЭМ изображение)

гался дезинтеграторной обработке для достижения дисперсности 100 – 150 мкм. Получение модификации углерода с аморфной структурой выполнялось при температуре 950 °С [10 – 13]. Далее углеродная модификация подвергалась механохимической обработке на варио - планетарной мельнице “Pulverisette-4” фирмы “Fritsch” (Германия). Размалывающими телами в варио-планетарной мельнице являлись шары из твердого сплава ВК-6 диаметром 16 мм. Механореактор варио-планетарной мельницы представлял собой герметический контейнер из коррозионно-стойкой стали с вставкой из твердого сплава ВК-6. При выполнении экспериментов применялся следующий режим: число оборотов главного диска 400 мин⁻¹, число оборотов сателлитов 800 мин⁻¹, интенсивность (отношение массы исходных материалов к массе размалывающих шаров) 1:50.

Строение нановолокнистого углерода исследовали на электронном сканирующем микроскопе

высокого разрешения “Hitachi S5500” (Япония) с приставкой для просвечивающей микроскопии.

Исследование удельной поверхности выполняли на анализаторе удельной поверхности серии “Сорбтометр-М”, ЗАО “КАТАКОН” (Россия, г. Новосибирск), значение удельной поверхности устанавливали по термодесорбции азота.

Согласно литературным данным [2], сорбционные свойства УНТ по отношению к неорганическим ионам зависят не только от высокоразвитой поверхности, но и от наличия и концентрации на поверхности функциональных групп (–ОН, –С=О, –СООН и др.). В настоящей работе изучалась сорбция катионов серебра, меди, свинца и кадмия из водных растворов. В качестве сорбентов исследовали четыре серии нанотрубок, полученных после 7, 8, 10 и 27 ч механохимической обработки аморфного углерода. Внутри каждой серии имелись образцы, обработанные концентрированной азотной кислотой при различной температуре.

Кислотность углеродных нанотрубок (H^+ , ммоль/г) в зависимости от времени их формирования и температуры обработки

Время формирования углеродных нанотрубок, ч	Температура обработки в HNO_3 конц., °С		
	20	80	120
8	0,36	0,47	0,58
10	0,52	0,73	0,91
27	0,39	0,71	1,12

Для исследования сорбционной емкости углеродные нанотрубки обрабатывали HNO_3 конц. при температуре 120 °С в аналитическом автоклаве в течение 55 мин, затем промывали полученные образцы дистиллированной водой в ультразвуковой мойке “Elmasonic S15” (Германия) в течение 45 мин до достижения нейтрального pH, после чего обрабатывали в центрифуге в течение 15 мин и высушивали в течение 75 мин при температуре 150 °С в сушильном шкафу “Binder”.

Для исследования сорбции ионов Ag^+ , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} готовили индивидуальные растворы с концентрацией 150 мг/л при соотношении Т:Ж = 0,1:25 (0,1 г углеродной нанотрубки на 25 мл раствора) в течение 130 мин при постоянном встряхивании. После установления сорбционного равновесия смесь отфильтровывали. Определение содержания металлов в фильтре осуществляли с помощью атомно-абсорбционной методики на спектрометре “AAAnalyst 200” (“PerkinElmer”, США).

Для получения сравнительных характеристик использовали активированный уголь медицинского назначения производства ОАО “Медисорб” (г. Пермь), ОАО “Фармстандарт — лексредства” (г. Курск), ОАО “Уралбиофарм” (г. Екатеринбург), а также активированный уголь “Silcarbon Aktivkohle GmbH”.

Измерение сорбции водорода углеродными многослойными нанотрубками выполняли на автоматизированной установке “Pressure-Composition

Isotherm (PCI) Measurement System Gas Reaction Controller”, фирмы “Advanced Materials Corporation” (США). Измерение осуществляли по методу Сивертса [17, 18], при данном методе измерения насыщение водородом может осуществляться из газовой фазы при различной температуре. Углеродные нанотрубки, полученные при 8 и 27 ч механоактивации, прессовались в таблетки диаметром 4 мм, высотой 3 мм, массой 0,03 г с помощью лабораторного фармацевтического пресса “Таблетпресс 6000S” (Россия); усилие сжатия (давление) составляло 1190 – 1230 кг/см² и было подобрано экспериментально. Образцы насыщались при интервале температур 294 – 300 °С и давлении 1,1 МПа в течение 62 мин.

Сорбционная емкость по катионам металлов углеродных нанотрубок и активированного угля в зависимости от времени формирования нанотрубок и марки активированного угля (приведены значения при времени экспозиции 1 ч, в скобках — данные для времени экспозиция 3 ч. Температура обработки в HNO_3 конц. 120 °С)

Углеродный материал	Сорбционная емкость, мг/г			
	Ag^+	Pb^{2+}	Cd^{2+}	Cu^{2+}
Углеродные нанотрубки после 8 ч механохимической обработки	59 (70)	51 (57)	47 (52)	37 (40)
Углеродные нанотрубки после 10 ч механохимической обработки	63 (74)	54 (61)	51 (57)	40 (44)
Углеродные нанотрубки после 27 ч механохимической обработки	85 (93)	70 (77)	65 (72)	59 (63)
Активированный уголь “Silcarbon Aktivkohle GmbH”	6,3 (7,4)	7,3 (8,5)	6,7 (7,4)	5,9 (6,4)
Активированный уголь ОАО “Медисорб”	9,2 (10,9)	10,3 (11,7)	8,3 (9,5)	7,3 (8,2)
Активированный уголь ОАО “Фармстандарт — лексредства”	9,7 (9,7)	10,2 (12,2)	7,8 (8,8)	7,2 (8,1)
Активированный уголь ОАО “Уралбиофарм”	7,9 (8,7)	8,9 (9,3)	7,5 (8,2)	6,9 (7,3)

Таблица 3

Сорбционная емкость по катионам металлов и удельная поверхность в зависимости от времени хранения углеродных нанотрубок (приведены значения при времени экспозиции 1 ч, в скобках — данные для времени экспозиция 3 ч)

Время хранения нанотрубок, ч	Сорбционная емкость, мг/г				Удельная поверхность, м ² /г
	Ag ⁺	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Cu ²⁺	
2	579 (598)	511 (523)	403 (411)	390 (397)	2305
20	503 (509)	486 (495)	383 (400)	377 (399)	2183
200	197 (203)	164 (172)	128 (135)	111 (115)	1559
2000	59 (70)	51 (57)	47 (52)	37 (40)	1050

Результаты. На рисунке представлено изменение формы аморфного углерода в процессе его механохимической обработки. Как видно (а), образования нановолокнистого углерода не наблюдается в течение 6 ч механоактивации, аморфный углерод сохраняет свою округлую и пластинчатую форму. После 8 ч обработки (б) наблюдается процесс формирования нановолокнистой структуры, который реализуется в массиве углеродной частицы (в), при этом образуются нанотрубки диаметром до 10 нм. После 10 ч механоактивации весь объем обрабатываемого материала состоит из углеродных нанотрубок диаметром от 10 до 70 нм (г, д), при этом увеличение длительности механообработки, вплоть до 27 ч (е), не приводит к качественным изменениям углеродного материала.

Способность к окислительной модификации зависит от технологических параметров получения нанотрубок, в частности от времени механохимической обработки. В табл. 1 представлены данные по общей кислотности нанотрубок, сформированных в течение 8 – 27 ч механохимической обработки и затем обработанных HNO₃ конц. при различной температуре. Как видно, максимальной кислотностью обладают углеродные нанотрубки, полученные после 27 ч механоактивации и затем обработанные HNO₃ конц. при 120 °С в аналитическом автоклаве.

Из данных, опубликованных в работе [2], следует, что окисление (модификация) нанотрубок легче протекает в материале, имеющем в большом количестве дефекты структуры. Очевидно, что уменьшение времени механохимической обработки углеродных нанотрубок приводит к снижению их дефектности.

В табл. 2 представлено изменение сорбционной емкости углеродных нанотрубок по катионам металлов в зависимости от времени механохимической обработки и условий обработки, а также, для

сравнения, сорбционная емкость различных активированных углей. Установлено, что максимальная сорбция по всем исследованным элементам наблюдается у углеродных нанотрубок, полученных после 27 ч механохимической обработки, что на 30 – 40 % превышает сорбцию нанотрубок, сформированных после 8 и 10 ч механоактивации аморфного углерода и на порядок выше значений, регистрируемых для исследованных марок активированных углей.

В табл. 3 приведена сорбционная емкость углеродных нанотрубок, полученных в результате механохимической обработки аморфного углерода в течение 8 ч, в зависимости от времени хранения углеродного материала (время, прошедшее с момента окончания формирования нанотрубок). Как видно, увеличение времени хранения приводит к значительному снижению сорбционной емкости и удельной поверхности углеродных нанотрубок. Наиболее значительное снижение сорбционной емкости и удельной поверхности нанотрубок, сформированных в процессе механохимической обработки, наблюдается в первые 200 ч хранения углеродного материала, что необходимо учитывать в практике использования данного материала в качестве сорбента.

Емкость по водороду для МУНТ (8 ч) составила 7,3 мас. %, емкость по водороду для МУНТ (27 ч) составила 5,9 мас. %, что подтверждает высокую сорбционную емкость по отношению к водороду углеродных многослойных нанотрубок, сформированных с помощью механоактивации. Сорбционная емкость по отношению к водороду ведет себя противоположно с емкостью по отношению к тяжелым металлам. Происходит незначительное снижение сорбционной емкости с 7,3 до 5,9 мас. %, что обусловлено повышением дефектности структуры МУНТ, которая увеличивается со временем механоактивации аморфного углерода до 27 ч.

Выводы

1. Представлены комплексные исследования сорбционных свойств углеродных нанотрубок, полученных в результате механохимической обработки аморфного углерода, сформированного пиролизом сфагнома бурого.

2. Установлено, что способность к окислительной модификации углеродных нанотрубок зависит от времени их формирования в процессе механохимической обработки.

3. Показано, что определяющим фактором, влияющим на величину сорбционной емкости углеродных нанотрубок, является длительность хранения нановолокнистого материала. Минимальному времени хранения углеродного материала соответ-

ствуют максимальная удельная поверхность и наибольшая сорбционная емкость нановолокнистого углерода.

4. Достигнута высокая сорбционная емкость по отношению к водороду: 7,3 мас. % для МУНТ, полученных при 8 ч механоактивации, и 5,9 мас. % при 27 ч. Снижение сорбционной емкости по отношению к водороду обусловлено повышением дефектности структуры МУНТ, которая прогрессирует с увеличением времени механоактивации.

Список литературы

1. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Российский химический журнал. 2002. Т. 1. № 5. С. 50 – 56.
2. Гражданова С. С., Редькин А. Н., Телегин Г. Ф., Золотарева Н. И. Исследование углеродных наноматериалов как потенциальных сорбентов для концентрирования примесей в атомно-спектроскопических методах анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. № 9 (74). С. 7 – 11.
3. Дудина С. Н., Свергузова С. В., Кирюшина Н. Ю. Влияние УФ-обработки глин на эффективность очистки модельных растворов от ионов никеля и железа (III) // Экология и промышленность России. 2008. № 5. С. 47 – 48.
4. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 4. С. 403 – 404.
5. Ивановский А. Л. Неуглеродные нанотрубки: синтез и моделирование // Успехи химии. 2002. Т. 71. № 3. С. 204 – 224.
6. Тарасов Б. П., Гольдшлегер Н. Ф., Моравский А. П. Водородсодержащие углеродные наноструктуры: синтез и свойства // Успехи химии. 2001. Т. 70. № 2. С. 150 – 166.
7. Ye Y., Ahn C. C., Witham C., Fultz B., Liu J., Rinzler A. G. Hydrogen adsorption and cohesive energy of single-walled carbon nanotubes. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. 16. P. 2307 – 2309.
8. Земнухова Л. А., Шкорина Е. Д., Федорищева Г. А. Исследование состава неорганических компонентов шелухи и соломы гречихи // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. № 2. С. 324 – 328.
9. Кузьмина Р. И., Штыков С. Н., Панкин К. Е. и др. Пирогенетическая переработка некоторых древесных отходов и отходов лущения семян // Химия растительного сырья. 2010. № 3. С. 61 – 65.
10. Онищенко Д. В., Рева В. П. Углеродные модификации из растительного сырья для формирования функциональных материалов // Кокс и Химия. 2012. № 5. С. 40 – 45.
11. Онищенко Д. В., Чаков В. В. Возобновляемое растительное сырье как основа для получения функциональных наноконструктивных материалов универсального назначения // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84. № 9. С. 1562 – 1566.
12. Пат. РФ на полезную модель № 67777. Устройство для изготовления анодного материала / Попович А. А., Онищенко Д. В.
13. Пат. РФ на полезную модель № 72358. Устройство для изготовления анодного материала / Попович А. А., Онищенко Д. В.
14. Халявка Т. А., Карпенко Г. Ф., Опенько Н. М. и др. Углеродные и синтетические сорбенты для обеззараживания питьевой воды от холерного вибриона // Химия и технология воды. 1998. Т. 20. С. 330 – 335.
15. Щукина А. В., Епифанцева Н. С., Симкин Ю. Я. и др. Кора сплавной пихты сибирской — сырье для производства древесноугольных материалов // Химия растительного сырья. 2006. № 2. С. 61 – 62.
16. Merkoçi A. Carbon Nanotubes: Exciting New Materials for Microanalysis and Sensing // Microchim. Acta. 2006. V. 152. № 3 – 4. Pp. 155 – 157.
17. Tyurin Yu. I., Larionov V. V., Nikitenkov N. N. Ionizing Radiation-Stimulated Diffusion and Desorption of Hydrogen from Metals // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2011. Vol. 85. № 6. Pp. 1047 – 1053.
18. Robert A. Varin, Tomasz Czujko, Zbigniew S. Wronsky. Nanomaterials for Solid State Hydrogen Storage. ISBN 978-0-387-77711-5. 2009.

От редакции

Автор публикуемой ниже статьи В. В. Тетельмин активно продвигает гипотезу о механизме прогиба земной коры от веса крупных водохранилищ. На эту тему он сделал доклады на технофизической конференции в Институте физики Земли РАН (9 октября 2012 г.), на научно-технической конференции во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (25 октября 2012 г.) и на заседании комиссии экспертов по оценке системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС (31 октября 2012 г.).

Редакционная коллегия журнала “Гидротехническое строительство” неоднократно рассматривала эту статью на своих заседаниях. Несмотря на несогласие членов редколлегии с гипотезой В. В. Тетельмина, принято решение о публикации статьи вместе с рецензиями.

Редакция

Решение задачи прогиба земной коры как возможного фактора воздействия на поведение плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Тетельмин В. В., доктор техн. наук (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева)

Рассмотрен механизм прогиба земной коры от веса крупных водохранилищ. Предлагается расчетная модель и соответствующее аналитическое решение. Даются примеры расчета прогиба земной коры в ложе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС с использованием натуральных данных по динамике прогиба земной коры в районе плотины Гувер.

Ключевые слова: упругая земная кора, вязкое мантийное вещество, динамика прогиба, архимедова сила, модуль упругости, коэффициент вязкости.

С позиций современной гидротехнической науки земная кора — это прочная горная порода, способная выдержать нагрузку в миллиарды тонн, создаваемую весом водохранилища и плотины. Однако земная кора не является “твердью”, она плавает в подкоровом субстрате горячей магмы и при этом стремится к достижению состояния изостазии. Любые значимые нагрузки на земную кору приводят к изменению изостатического равновесия. Такими значимыми нагрузками являются крупные водохранилища весом в десятки и сотни миллиардов тонн. К 2010 г. на Земле построено не менее 45 водохранилищ, объем каждого из которых превосходит 25 км³.

В задачах тектонофизики земную кору рассматривают как упругую пластину, плавающую в тяжелой высоковязкой жидкости. При исследовании сложного явления изостазии физика земной коры использует следующие постулаты [1, 5, 6, 14]:

при добавочной удельной нагрузке на земную кору более 1 МПа, приложенной по большой площади, возникает вертикальное смещение блоков литосферы в направлении восстановления изостатического равновесия;

заметные смещения блоков, компенсирующие дополнительную нагрузку, возникают, если нагрузка приложена по площади, размеры которой превосходят или соизмеримы с размерами составляющих литосферу блоков;

восстановление нарушенного состояния изостазии происходит благодаря перетеканию мантийного вещества, вязкость которого составляет $10^{18} - 10^{20}$ Па · с.

Свойство изостазии современная гидротехника во внимание не принимает. В то же время именно прогиб всей толщи земной коры может быть одной из причин многих необъясненных процессов, происходящих в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Арочная плотина СШГЭС эксплуатируется при напорах 240 – 238 м с 1990 г. и проектировалась под стабильные условия её сцепления с основанием и берегами. В реальности же оказалось, что геологическая среда нестабильна, в результате чего возник “конфликт состояний” между плотиной и геологической средой [2, 5, 7, 8, 10, 11, 13].

Из более десятка наблюдавшихся и наблюдаемых необратимых процессов, происходящих в створе плотины СШГЭС, назовём следующие:

по показаниям высокоточного светодальномера длина хорды арки плотины на отметке гребня за 12-летний период наблюдений сокращается в среднем на 0,44 мм/год;

плановые перемещения береговых секций плотины измеряются с помощью системы прямых и обратных отвесов, которые также отмечают сближение берегов на уровне гребня;

в верхнем арочном поясе отмечается постоянный рост арочных сжимающих напряжений с интенсивностью около 0,12 МПа/год.

Все три названных процесса зафиксированы независимо друг от друга способами и подводят к одному выводу: береговые массивы в створе плотины СШГЭС сближаются.

В монографии [10] названы три вероятные причины наблюдаемых и до сих пор необъяснённых процессов в створе плотины СШГЭС:

- прогиб всей толщи земной коры;
- фильтрация в толще горных пород в упругом режиме на глубинах до нескольких тысяч метров;
- глубокое (до 500 м) охлаждение горных пород основания.

Ведущие российские гидротехники Э. Г. Газиев и А. И. Савич солидарны с точкой зрения автора. В работе [3] они пишут: "... прогиб земной коры, фильтрационные процессы в скальном массиве и охлаждение толщ основания, несомненно, присутствуют и оказывают своё влияние на НДС основания и плотины". Далее они замечают: "... связь между наблюдаемыми приповерхностными явлениями и глубинной геодинамикой земной коры существует, однако она, по-видимому, более слабая, чем это представляется В. В. Тетельмину".

В настоящей статье и в докладе [13] сделана первая в гидротехнической науке попытка количественной оценки амплитуды прогиба всей толщи земной коры (упругой оболочки литосферы) от веса водохранилища. Этот процесс может быть одной из причин наблюдающегося многолетнего сближения берегов, роста арочных напряжений и многих других процессов [8, 9, 10].

Любое крупное водохранилище является концентратором гравитационной энергии. Водохранилище своим весом нагружает всю толщу земной коры и таким образом передает ей часть сконцентрированной энергии земного притяжения. Земная кора, в свою очередь, преобразует получаемую потенциальную энергию в энергию медленного вертикального движения, длящегося в течение многих десятилетий. Это движение проявляется в плавном погружении всей толщи энергонасыщенной земной коры в вязкое вещество горячей мантии. Плавность погружения обеспечивается очень высокой вязкостью подстилающего мантийного вещества.

Сложность рассматриваемого нестационарного процесса прогиба толщ земной коры заключается в том, что в нём одновременно проявляют себя два феноменологических свойства: изгибная жёсткость упругой земной коры и текучесть (вязкость) горячего мантийного вещества.

Близким аналогом Саяно-Шушенского гидроузла является гидроузел Гувер на р. Колорадо (США) и его водохранилище объемом 35 млрд м³. Основные характеристики этого гидроузла и Саяно-Шушенского совпадают: обе плотины арочные, высота их более 200 м, в основании обеих плотин залегают сланцы, объёмы обоих водохранилищ соизмеримы. В 1935 г. до начала заполнения водохранилища

была проведена высокоточная нивелировка по нескольким линиям, общая длина которых составила более 1000 км. В 1950 г. было проведено повторное нивелирование, которое показало, что прогиб земной коры от веса водохранилища составил 170 мм, а в 1963 г. — 200 мм. После наполнения водохранилища скорость погружения земной поверхности достигала 20 мм/год, а в дальнейшем сократилась до 2,3 мм/год (рис. 1). Погружение поверхности земной коры захватило площадь 30 тыс. км², что на два порядка больше площади водного зеркала [5].

Земная поверхность на расстоянии 50 км северо-западнее от водохранилища погрузилась (дала осадку) на 30 мм. Воронка оседания (радиус прогиба) земной поверхности в этом направлении простирается примерно на расстояние $R = 70$ км от уреза водохранилища. Принимая во внимание отмеченную общность основных показателей гидроузла Гувер и СШГЭС, в дальнейшем используем значение радиуса влияния прогиба $R = 70$ км, полученное из натурных данных.

Водохранилище СШГЭС имеет в плане протяженность около 250 км, что обеспечивает полосовую (линейную) нагрузку на земную кору. Данная особенность позволяет рассматривать прогиб земной коры в плоскости, ориентированной поперёк оси водохранилища, как плоскую задачу теории упругости.

В первом приближении задачу можно свести к определению прогиба шарнирно-опёртой упругой балки длиной $L = 2R = 140$ км, плавающей в тяжелой высоковязкой жидкости [8]. При таких масштабах воздействия водохранилища и плотина в расчетной модели представляются материальной точкой, а удельная сила P_0 веса (вес отсека единичной длины водохранилища) прикладывается к балке как сосредоточенная сила. Применительно к условиям СШГЭС эта сила примерно равна $P_0 = 2 \cdot 10^5$ т/м = $2 \cdot 10^9$ Н/м.

Мощность h земной коры, в пределах которой она заметно проявляет упругие свойства, для разных районов Земли изменяется в пределах примерно 30 – 40 км [1, 5, 6, 14]. На этих глубинах температура горных пород приближается к 900° С, поэтому здесь породы переходят из класса упругих в класс пластичных и вязких. Мощность земной коры определяет момент инерции J прямоугольного сечения упругой оболочки земной коры.

Модуль упругости E земной коры в пределах толщ может изменяться с глубиной от $2 \cdot 10^4$ до $8 \cdot 10^4$ МПа. В соответствии с названными значениями изгибная жёсткость земной коры EJ может изменяться в пределах от $3 \cdot 10^{22}$ до $24 \cdot 10^{22}$ Н · м².

В рассматриваемой модели вытесняемая погружающейся земной корой жидкость является несжимаемой, поэтому прогиб упругой оболочки будет сопровождаться компенсационным поднятием за

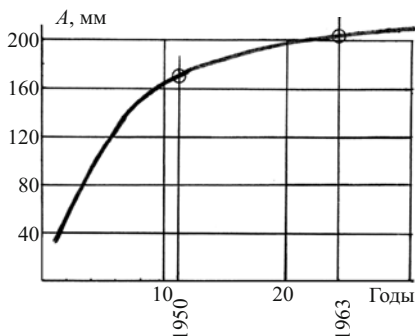


Рис. 1. Натурные данные динамики погружения ложа водохранилища в районе плотины Гувер (радиус влияния прогиба $R = 70$ км)

пределами рассматриваемой части погружающейся оболочки (рис. 2).

Собственно прогиб происходит на участке ОСО. В рассматриваемых условиях плоской задачи теории упругости прогиб этого участка земной коры при известном радиусе влияния $R = 70$ км можно считать как прогиб шарнирно-опёртой балки (рис. 3).

После создания водохранилища по мере погружения подошвы земной коры в жидкое вещество мантии часть P_V нагрузки воспринимается упругой оболочкой, а часть P_A воспринимается архимедовой силой. По мере заглубления земной коры в тяжёлую жидкость архимедова сила $\uparrow P_A$ и сила упругости $\uparrow P_V$ всё более увеличиваются. Погружение земной коры происходит до тех пор, пока в результате перераспределения сил не наступит состояние изостатического равновесия: $\uparrow P_V + \uparrow P_A = \downarrow P_O$.

Объем жидкости, вытесняемой прогибающейся оболочкой, определяется площадью фигуры ОСО (рис. 4, а). Полная подъемная сила, действующая на подошву земной коры в результате прогиба и компенсационного поднятия, определяется площадью фигуры ВОСОВ:

$$\uparrow P_A = S_{\text{ВОСОВ}} \cdot \rho g, \quad (1)$$

где $\rho = 3200 \text{ кг/м}^3$ — плотность вязкого мантийного вещества [1, 5, 14]; g — ускорение силы тяжести.

Процесс прогиба земной коры является симметричным относительно точки приложения сосредоточенной силы P_O веса водохранилища. Поэтому погружение каждой половины балки в подстилающее полупространство вязкой жидкости можно рассматривать как результат их вращения вокруг

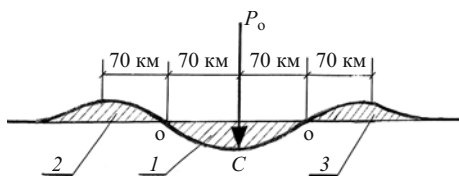


Рис. 2. Форма и примерные размеры прогиба и компенсационного поднятия земной коры от веса водохранилища P_O : 1 — область погружения; 2 — области компенсационного поднятия

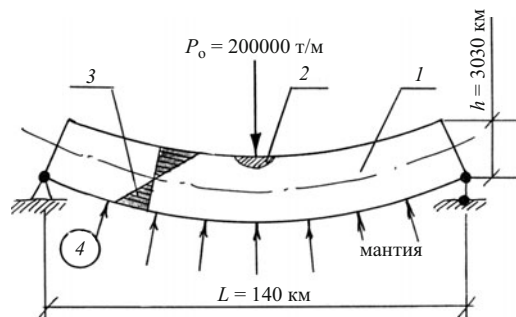


Рис. 3. Схема прогиба упругой земной коры, плавающей в тяжелой вязкой жидкости: 1 — упругая земная кора толщиной $h = (30 - 40)$ км; 2 — область традиционных расчётов воздействия гидроузла на полупространство горных пород; 3 — эпюра напряжений в сечении земной коры; 4 — вектора гидростатического давления со стороны вязкой мантии на подошву погружающейся земной коры, формирующие архимедову силу P_A

своей фиксированной точки O (рис. 4, б). Примем точку O , отстоящую от точки приложения силы P_O на расстоянии R , за центр вращения системы “земная кора–вязкая мантия” в пределах этого радиуса. По одну сторону от точки O происходит прогиб земной коры, а по другую — компенсационное поднятие. Круговое движение каждой половины балки происходит под действием вращающего момента M , создаваемого половиной сосредоточенной силы ($P_O/2$), действующей с плечом R , т.е. $M = (P_O R/2)$.

В рассматриваемой ротационной модели оседающая земная кора формирует в полупространстве горячей мантии два круговых потока вязкой жидкости. В пределах каждого из двух радиусов $R = L/2$ принудительно заглубляемая жидкость участвует в круговом движении вокруг точки O как квазитвёрдое цилиндрическое тело. Угловая скорость вращения цилиндрического тела $\omega = V/R$, где

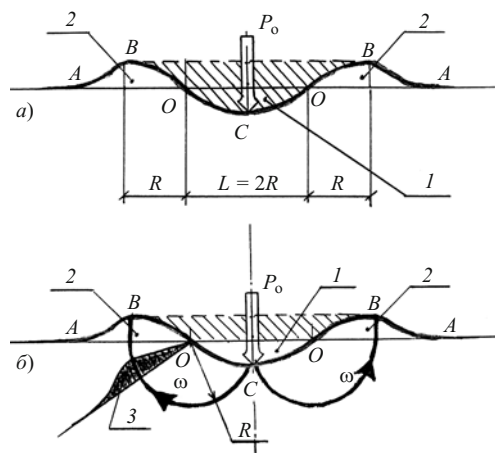


Рис. 4. Схема прогиба и формирования компенсационного поднятия земной поверхности от действия силы веса P_O водохранилища: а — области погружения (1) и компенсационного поднятия (2); $L = 2R$ — размер области погружения; б — погружение и компенсационное поднятие как результат вращения половины прогибающейся балки вместе с мантийным веществом вокруг фиксированной точки O : 1 — область погружения; 2 — две области компенсационного поднятия; 3 — эпюра скорости течения мантийного вещества; ω — угловая скорость вращения квазитвёрдого цилиндра радиусом R

V — линейная скорость погружения земной коры в месте приложения силы P_0 .

В условиях Саяно-Шушенского гидроузла при значении сосредоточенной силы $P_0 = 2 \cdot 10^9$ Н/м и радиусе $R = 7 \cdot 10^4$ м касательное напряжение на поверхности вращающегося квазитвердого полуцилиндра $\uparrow R = 4,55$ кПа. За пределами радиуса R квазитвёрдый полуцилиндр мантийного вещества, вращающийся с угловой скоростью $\omega = V/R$, вовлекает за счёт сил вязкости в круговое движение прилегающие слои жидкости.

Вращательное движение цилиндра в вязкопластичной жидкости описывается уравнением Рейнера [12], из которого для рассматриваемых условий начальная скорость погружения земной коры

$$V = \frac{M}{2\pi\mu R}, \quad (2)$$

где $M = P_0 R/2$ — вращающий момент на выделенном элементе половины балки, создаваемый половиной удельной нагрузки от веса водохранилища; μ — динамическая вязкость подстилающего земную кору мантийного вещества.

Это выражение позволяет определять вязкость подстилающей земную кору жидкости при известной полосовой (линейной) нагрузке и известной скорости погружения земной коры. В частности, с использованием натурных данных рис. 1 определена вязкость мантийного вещества, подстилающего земную кору в районе плотины Гувер. Исходные параметры следующие: создаваемая водохранилищем этого гидроузла удельная нагрузка на земную кору $P_0 = 400$ тыс. т/м, радиус вращения в процессе прогиба $R = 70$ км, скорость погружения плотины и ложа водохранилища в начале эксплуатации $V = 20$ мм/год. Полученное значение динамической вязкости $\mu = 0,5 \cdot 10^{18}$ Па·с соизмеримо с известными значениями вязкости астеносферы [1, 5, 6, 14]. Это значение является средним по большому объёму верхней мантии и астеносферы, вовлеченному в расчетный процесс.

Форма эпюры скорости объясняет форму кривой компенсационного поднятия земной поверхности. В рассматриваемой схеме погружение происходит в пределах области радиусом $R = 70$ км в каждую сторону от уреза водохранилища, а компенсационное поднятие поверхности происходит в интервале примерно от 70 до 180 км в каждую сторону от уреза водохранилища.

В рассматриваемой модели на каждом этапе расчета значение силы упругого прогиба $\uparrow P_Y$ оболочки земной коры следует увеличивать в три раза ($3\uparrow P_{Yi}$), потому что в данном процессе идентичный упругий прогиб происходит ещё на двух участках компенсационного поднятия. На каждом последующем шаге расчета Δt_i динамики прогиба актив-

ная (нескомпенсированная) часть веса водохранилища P_i , которая формирует амплитуду прогиба, будет уменьшаться:

$$P_i = (P_0 - 3\uparrow P_{Yi} - \uparrow P_{Ai}). \quad (3)$$

Амплитуда прогиба $A_{\text{прог}, i}$ земной коры на произвольном i -том шаге расчета равна сумме приращений амплитуды, полученных на каждом из N шагов расчета:

$$A_{\text{прог}, i} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \Delta t_i}{4\pi\mu}, \quad (4)$$

где P_i — нескомпенсированная часть удельной нагрузки, определяемая из (3); Δt_i — шаг во времени, определяющий время действия силы P_i на каждом шаге расчета.

Из условий прогиба упругой балки находим выражение, связывающее её прогиб и упругую реакцию:

$$P_{Yi} = \frac{4EJA_{\text{прог}, i}}{R^3}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что на протяжении всего процесса прогиба земной коры радиус влияния R остается постоянным и зависит только от изгибной жёсткости EJ , так как в рассматриваемых условиях относительно небольшого прогиба отношение $A_{\text{прог}, i}/P_{Yi}$ постоянно.

Подставив в выражение (5) зависимость (4), получим уравнение, связывающее между собой все параметры процесса прогиба земной коры от действия веса водохранилища:

$$\frac{EJ\Delta t_i \sum_{i=1}^N P_i}{\pi\mu P_{Yi}} = R^3. \quad (6)$$

Расчетные параметры динамики погружения ложа водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС за счет прогиба земной коры. Удельная нагрузка на земную кору $P_0 = 200$ тыс. т/м; изгибная жёсткость оболочки земной коры $EJ = 3,37 \cdot 10^{22}$ Н·м²; вязкость мантийного вещества $\mu = 0,5 \cdot 10^{18}$ Па·с.

Время с начала процесса, годы	Скорость погружения, мм/год	Амплитуда погружения, мм	Подъемная сила, т/м	Нескомпенсированная часть веса водохранилища, т/м
2	10	20	20 600	179 400
4	8,95	37,9	39 100	160 900
8	7,22	68,47	70 500	129 500
12	5,83	93,09	95 800	104 200
20	3,76	128,75	132 600	67 400
24	3,02	141,48	145 600	54 400
30	2,13	156,06	161 700	38 300

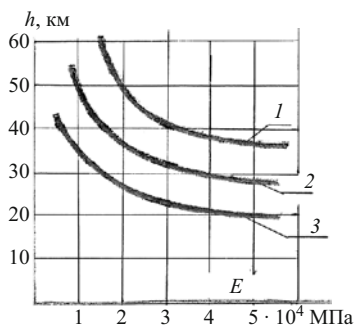


Рис. 5. Графики зависимости эффективной толщины земной коры h от эффективного модуля упругости E при разных значениях изгибной жёсткости EJ : 1 – $24 \cdot 10^{22} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$; 2 – $8 \cdot 10^{22} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$; 3 – $3,4 \cdot 10^{22} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$

С помощью полученного решения определена динамика процесса погружения земной коры вместе с ложем водохранилища СШГЭС (таблица) при относительно небольшой изгибной жёсткости.

При изгибной жёсткости земной коры $EJ = 8 \cdot 10^{22} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ (рис. 5) амплитуда прогиба ложа водохранилища к настоящему времени составляет $A = 141 \text{ мм}$; при изгибной жёсткости $EJ = 24 \cdot 10^{22} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ амплитуда прогиба составляет $A = 107 \text{ мм}$.

С помощью полученного решения и натуральных данных рис. 1 определена изгибная жёсткость земной коры в районе плотины Гувер. Значение EJ оказалось достаточно большим: $24 \cdot 10^{22} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$. Из рис. 5 следует, что при эффективном модуле упругости $E = 3 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ толщина земной коры в районе плотины Гувер примерно равна 40 км. Если принять $E = 5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, то толщина земной коры $h = 36 \text{ км}$.

Выводы

1. К 2010 г. на Земле построено не менее 45 водохранилищ, объем каждого из которых превосходит 25 км^3 . Строительство подобных крупных гидротехнических сооружений вызывает локально-изостатический отклик земной коры на создаваемую плотинами и водохранилищами нагрузку.

2. Предложенная расчётная модель и полученное решение описывают количественную сторону процесса прогиба — поднятия земной коры от действия полосовой (линейной) нагрузки с учётом основных параметров, определяющих динамику процесса.

3. Адекватность модели подтверждается реальными значениями вязкости мантийного вещества и изгибной жёсткости земной коры, полученными с использованием натуральных данных прогиба территории в районе плотины Гувер (США).

4. Прогиб земной коры в районе водохранилища плотины Саяно-Шушенской ГЭС простирается примерно на 60 – 70 км в обе стороны от осевой линии водохранилища.

5. Компенсационное поднятие земной коры происходит по обеим сторонам от осевой линии водохранилища СШГЭС на расстоянии от 60 до 170 – 180 км в каждую сторону.

6. За годы эксплуатации СШГЭС амплитуда прогиба земной коры по оси водохранилища может составлять от 100 до 160 мм.

7. В настоящее время процесс прогиба земной коры под ложем водохранилища продолжается с расчётной интенсивностью 1 – 2 мм/год.

8. Подвижность геологической среды, обусловленная прогибом земной коры от веса водохранилища, может являться одним из факторов воздействия и нестабильности поведения плотины СШГЭС.

9. Изменение НДС большой по глубине и по площади земной коры может являться причиной наведенных сейсмических событий с гипоцентром на большой глубине и большом удалении от водохранилища.

Список литературы

1. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. — М.: Наука, 1993. 456 с.
2. Тетельмин В. В. Сильные техногенные воздействия на земную кору // Бринкман Э. Физические проблемы экологии: Пер. с англ. — М.: ИД "Интеллект". 2012. 288 с.
3. Газиев Э. Г., Замахаев А. М., Савич А. И. О проблеме нестационарного состояния плотины и скального основания Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2012. № 1. С. 45 – 47.
4. Дурчева В. Н., Пермякова Л. С. Состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натуральных наблюдений // Тезисы докладов VII конференции "Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии" / ВНИИГ. 2012. С. 109.
5. Никонов А. А. Современные движения земной коры. — М.: КомКнига, 2007. 192 с.
6. Сорохтин О. Г. Жизнь Земли. — М. — Ижевск: ИКИ, 2007. 452 с.
7. Стефаненко Н. И., Затева В. Б., Пермякова Л. С. и др. Поведение Саяно-Шушенской плотины после катастрофического разрушения здания ГЭС // Гидротехническое строительство, 2010. № 1. С. 5 – 10.
8. Тетельмин В. В. Воздействие строительства крупных гидротехнических сооружений на изостатическое состояние земной коры // Гидротехническое строительство. 2009. № 11. С. 46 – 50.
9. Тетельмин В. В. Анализ необратимых процессов в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2010. № 2. С. 47 – 51.
10. Тетельмин В. В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС: состояние, процессы, прогноз. — М.: Издательский дом "ЛИБРОКОМ", 2011. 240 с.
11. Тетельмин В. В. О версии причины аварии и необходимости снижения напора на Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник РАЕН. 2010. Т. 10. № 1. С. 19 – 24.
12. Тетельмин В. В., Язев В. А. Реология нефти. — М.: Интеллект, 2009. 256 с.
13. Тетельмин В. В. Механизм прогиба земной коры от веса крупных водохранилищ // Доклады III тектонофизической конференции "Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле" / Институт физики Земли РАН. 2012. С. 335 – 339.
14. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. — М.: КДУ, 2005. 560 с.

Рецензии на статью В. В. Тетельмина “Решение задачи прогиба земной коры как возможного фактора воздействия на поведение плотины Саяно-Шушенской ГЭС”

Рецензия 1

В рассматриваемой статье автор вторгается в область фундаментальных наук о глубинном строении Земли, утверждая в первой фразе, что “земная кора — это прочная горная порода” и далее — “земная кора не является “твёрдью”, она плавает в горячей магме и “стремится к достижению состояния изостазии”, которое гидротехническая наука игнорирует.

После цитирования постулатов физической тектоники из книги Е. В. Артюшкова (1993 г.) он формирует модель шарнирно-опёртой балки сечением 30×30 км, длиной 140 км, которая прогибается в тяжелую раскалённую жидкость мантии. Не касаясь анализа методики расчёта с произвольными упрощениями и допущениями, отметим принципиальные ошибки, допущенные автором, с позиций современных представлений ИФЗ РАН о земной коре и мантии.

1. Район Западного Саяна — это горная область, где граница Мохоровичича (М) расположена на глубине более 40 км, а не 30 км. Тектонически Джебашско-джойский блок-антиклинорий относится к блокам “менее интенсивных поднятий” (Л. К. Зятькова, 1977 г.) с высокой тектонической активностью (Солоненко, 1993 г.) т.е. вектор унаследованного движения интрузии направлен вверх, против предполагаемого автором прогиба.

2. Вмещающий водохранилище геоблок — это энергонасыщенная среда, сложно построенное горное сооружение с высоким уровнем собственных тектонических напряжений. На отметках расположения плотины они сопоставимы с напряжениями в плотине от внешних техногенных воздействий. Собственные тектонические напряжения в расчётах В. В. Тетельмина не учитываются как граничные условия.

3. Напряженно-деформированное состояние земной коры определяется геодинамическими процессами, энергия которых несопоставима с энергией техногенных нагрузок. В пределах расчётной области, выделенной В. В. Тетельминым, произошло множество возбуждённых землетрясений, а в приводохранилищном регионе только в 2011 г. произошли Хакасское и два Тывинских землетрясения с суммарной энергией 30 в 14 степени Дж. По карте ОСР-97 район имеет сейсмичность 9 баллов. В таких условиях любые статические расчёты при отсутствии достоверной исходной информации бессмысленны, а постановка плоской задачи без граничных условий некорректна. Расчётную область

со сложным горным рельефом трудно представить в виде “балки”. Стратификация по температуре по сечению такой “балки” от поверхности до границы Мохо составит от нуля до 2500 градусов с соответствующим изменением жесткости.

4. Земная кора — это иерархия блоков твёрдой коры и верхней мантии (литосфера). Граница литосферы с нижней мантией-расплавом (астеносферой) проходит существенно ниже границы М. Подвижки в литосфере происходят по границам блоков, что отличает их от “балочного” характера прогибов. Расчётные приёмы сопротивления материалов здесь неприменимы. Погружение упругой твёрдой коры в мантию осуществлялось бы по блочно, с учётом горного рельефа и разломов, вызвало бы температурные изменения характеристик жёсткости “балки”, что в расчёте не учитывается.

5. Осадка приповерхностной земной коры под техногенной нагрузкой происходит в результате уплотнения трещинно-поровой среды пород основания и их реологических свойств, а также вытеснения флюида. Глубина распространения деформаций и напряжений от техногенной нагрузки, их диссипация, может быть определена по задаче Буссинеска (сила на границе упругого полупространства) и ограничивается условием достижения равенства с тектоническими напряжениями (до 500 м по исследованиям на Ингури по А. И. Савичу). Что касается изостазии, то она реализуется самоорганизацией на границе М благодаря реологическим свойствам с участием флюидов и температуры (Н. И. Павленкова, 2004 г.).

6. Непроектное состояние плотины — сокращение хорд и рост арочного сжатия — объясняется не погружением коры в мантию, а главным образом перераспределением напряжений из гравитационной схемы в арочную из-за раскрытия контакта с основанием под напорной гранью, осадкой основания, разгрузкой тектонических напряжений в массивах береговых примыканий и температурными напряжениями. Вектор сжатия в локальном поле тектонических напряжений направлен нормально к руслу (данные ИЗК СО РАН). Эти процессы будут постепенно затухать при условии постоянного контроля и ремонта основания.

7. Вычисленный прогиб на ширине “балки” 30 – 40 км относится, вероятно, к месту максимальной глубины водохранилища. Правомерно ли переносить его в створ плотины?

Марчук А. Н., доктор техн. наук (ИФЗ РАН)

Рецензия 2

Предложенная автором модель прогиба земной коры на примере эффекта от водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС с использованием данных по наблюдениям на гидроузле Гувера, заявленном как аналог, представляет определённый интерес в качестве попытки обоснования гипотезы возможности значимого регионального воздействия на глубинные планетарные феномены, захватывающие земную кору и подпирающий её магматический расплав.

Имея предметом анализа явления (гравитационные нагрузки от водохранилища), сомасштабные области непосредственного внедрения — полупространства приповерхностного горного массива, вмещающего объект, автор рассматривает их относительно сред, для которых значимость этих явлений, по традиционным представлениям, сомнительна.

Принятые как основания решения задачи прогиба литосферы условия требуют подтверждений, даже только по формальным признакам:

1. Если порядок значений дополнительных напряжений от массы водохранилища (1 – 2 МПа) соответствует условию вертикальных смещений блоков, то размеры необходимой для этого площади приложения нагрузки, а равно и размеры (да и само наличие) соотносимых с ней структурных блоков литосферы в районе водохранилища не определены.

Нагрузки от водохранилища распределены линейно на участке 200 – 300 км при его минимальной ширине 5 – 10 км. По-видимому, именно последний показатель должен приниматься во внимание.

В связи с этим возникает вопрос: какой из названных размеров определяет по выбору автора возможность смещения “блоков” непроявленной природы и площади?

2. Утверждение, что в рассматриваемом случае сопротивлением литосферы можно пренебречь, требует доказательства. Более вероятно, что возникающим напряжённо-деформированным состоянием (НДС) по трассе водохранилища в активированном им приповерхностном (придонном) массиве потенциально ограничивается действие гравитационных и фильтрационных нагрузок. В частности, по данным наших сейсмических и ультразвуковых наблюдений за период 1978 – 1993 гг. изменения распределения скоростей распространения, характеризующие НДС, фиксируются в течение всего периода наблюдений, затухая по глубине, и ниже 40 – 50 м от подошвы плотины практически отсутствуют. Кстати, такое затухание изменений практически противоречит предположению о прогибе, якобы охватывающем толщу литосферы.

3. Ссылки автора на установленное наблюдениями сближение береговых опор плотины — явление конвергенции — не могут служить подтверждением

гипотезы о прогибе, с чем автор, по-видимому, согласен, оговаривая возможность иных причин.

Также не убеждают в гипотезе данные по осадке основания территории Саяно-Шушенской ГЭС, даже с учётом поправки, повышающей (по расчётной оценке?) измеренные значения.

Оценивая масштаб анализируемого явления, следует заметить, что дополнительная нагрузка от веса водохранилища не превышает долей процента только геостатической составляющей нагрузки в основании литосферы, тогда как автором собственный вес “балки” расчётной модели вообще не рассматривается.

Также вне рассмотрения оказываются дополнительные и основные (внешние и внутренние) нагрузки, действующие постоянно и кратковременно (в историческом смысле), в том числе динамические, неоднородно и неопределённо рассредоточенные в среде литосферы.

Неоднородная деформируемая среда, обладающая реологическими свойствами, автором моделируется абсолютно жёстким сплошным телом (невесомой балкой), внешняя нагрузка в которой якобы полностью (единственным образом) реализуется на прогибе.

Материал “горячей магмы”, проявляющийся в виде “полужидкости” — расплава на дневной поверхности, на самом деле *in situ*, пребывающей под давлением, приближающимся к 103 МПа, в предположительно твёрдом деформируемом (возможно, с пониженной сдвиговой прочностью) состоянии, едва ли уместно моделировать “несжимаемой жидкостью” и соответственно принимать расчётную схему вращения квазитвёрдого тела в вязкой жидкости. Упрощение модели, необоснованные допущения (например принято по неподтверждённой аналогии значение радиуса области “прогиба” $R = 70$ м) при исключительно низком (“фоновом”) уровне анализируемого феномена (что требует прецизионных оценок) не позволяют признать приведённые результаты анализа и используемую модель удовлетворительными.

Сама постановка проблемы экологических рисков при строительстве крупных гидротехнических объектов достойна акцентированного внимания, вводя её в сферу изучения, но в предложенном виде она может быть дискредитирована некорректными доказательствами и выводами.

По инициативе автора в журнале “Гидротехническое строительство” могла бы быть открыта дискуссия об экологической безопасности строительства гидротехнических объектов в более широком плане изучения этой, безусловно, актуальной проблемы, но это уже другая тема и предложенная работа (без сопровождающих её “обоснований”) рассматривается как стимул к такому обсуждению.

Шуйфер М. И., зам. директора проектной мастерской ООО “Гидроспецпроект”

Рецензия 3

По мнению рецензентов, содержание работы отчетливо распадается на два аспекта:

влияние геотектонических процессов на напряженно-деформированное состояние арочно-гравитационной бетонной плотины СШГЭС;

количественная оценка амплитуды прогиба земной коры от веса водохранилища.

Проанализируем степень обоснованности полученных автором результатов, относящихся к каждому из указанных аспектов.

Подтверждение своей гипотезы о влиянии геотектоники на напряженно-деформированное состояние бетонной плотины СШГЭС автор статьи находит в ежегодном сокращении длины хорды арки на гребне плотины (в среднем на 0,44 мм/год за 12-летний период наблюдений), плановых перемещениях береговых секций плотины и росте арочных напряжений в верхнем арочном поясе (на 0,12 МПа в год). Выполненный специалистами ВНИИГ и СШГЭС анализ, изложенный в работах [1, 2], не даёт каких-либо оснований для первых двух утверждений. Третий же вывод, как неоднократно отмечалось в дискуссиях, относится лишь к одному из телетензометров и потому не может служить подтверждением выводов, относящихся к системе “плотина — основание” в целом.

Необходимо отметить также, что незначительные тренды необратимого характера в некоторых диагностических показателях сооружения могут быть вызваны самыми разнообразными причинами, а их связь с геотектоническими процессами никем не доказана.

Точно так же остаются в роли гипотез три цитируемые из собственной монографии автора причины необъяснённых (?) процессов в створе плотины СШГЭС (прогиб всей толщи земной коры, фильтрация в упругом режиме на глубинах в тысячи метров и охлаждение горных пород основания на глубину до 500 м).

Таким образом, вся часть работы, относящаяся к первому аспекту, носит сугубо предположительный характер и поэтому в настоящий момент не может быть использована в практических целях.

Проанализируем теперь содержание той части работы В. В. Тетельмина, которая относится ко второму аспекту.

1. Статья В. В. Тетельмина является обновлённой версией его публикации на эту же тему [3], в которой автор пришел к выводу, что под действием веса водохранилища СШГЭС земная кора прогибается в магму на 1,0 – 1,3 м. Забегая несколько вперед, отметим, что в этих расчетах автор сильно занижил мощность земной коры h , произвольно приняв её в диапазоне 12 – 20 км, хотя по данным гео-

физических наблюдений для Западного Саяна она составляет 55 – 60 км [4, с. 38, рис. 14]. В обновленном варианте 2012 г. В. В. Тетельмин принимает расчетное значение (рис. 3) $h = 30$ км (без обоснования применительно к конкретному району — Западнему Саяну) и получает амплитуду прогиба 10 – 16 см, т.е. на порядок меньше, чем в своей предыдущей публикации. Не исключено, что если бы он принял значение h равным 55 – 60 км, сославшись на монографию Р. М. Деменицкой [4], то амплитуда, возможно, уменьшалась бы еще на порядок, снизившись до 1,0 – 1,6 см.

2. Принятая В. В. Тетельминым модель земной коры — однородная упругая балка не отвечает реальному, в первом приближении трехслойному, строению земной коры (по значениям модуля деформации $E_{\text{деф}}$, увеличивающегося с глубиной):

верхний, относительно разгруженный слой с пониженными значениями $E_{\text{деф}}$;

“гранитный слой” с высокими значениями $E_{\text{деф}}$ и плотности;

“базальтовый слой”, отличающийся еще более высокими значениями $E_{\text{деф}}$.

По поводу принятой автором модели (расчетной схемы) работы рассматриваемой области земной коры (рис. 3) необходимо сделать еще одно существенное замечание. Дело в том, что, снабжая свободными концами шарнирно закрепленную по краям балку, автор полностью исключает ее взаимодействие с остальной частью земной коры. Кроме того, расчетная схема в виде изогнутого стержня не дает возможности получить взаимные смещения точек модели в направлении оси стержня. В частности, остается без ответа вопрос о величине взаимного сближения точек наблюдения, совпадающих с береговыми упорами плотины. То есть нет возможности определить наиболее важный параметр, который связывает между собой процессы в земной коре и деформирование плотины, характеризуемое изменениями в длинах хорд ее арочных поясов.

3. Рассматривая пример — плотину Гувер, В. В. Тетельмин пишет о “прогибе земной коры” по данным геодезических измерений. Но измерения были выполнены на дневной поверхности (а не на подошве земной коры!), что позволяет говорить не о прогибе земной коры, а об осадке дневной поверхности, которая происходит за счет верхнего, наиболее деформируемого слоя. Хорошо известно, что при нагружении штампа в слое (1) на полупространстве (2), где $E_{\text{деф}1} < E_{\text{деф}2}$, основные смещения происходят именно в верхнем, более деформируемом слое. Таким образом, заметная осадка в верхней части разреза литосферы в результате строительства плотины и наполнения водохранили-

ща действительно имеет место и связана с большей деформируемостью (меньшим модулем деформации) приповерхностных слоев земной коры, но к мантии и магме это не имеет никакого отношения.

Б. Болт [5, с. 143] пишет: "... на глубине нескольких километров под водохранилищем добавочное давление (от веса водохранилища) составляет всего лишь малую долю от уже существующих тектонических напряжений".

Применительно к водохранилищу Саяно-Шушенской ГЭС такая "добавка" на границе "земная кора — мантия" равна $\Delta\sigma \approx 3 \cdot 10^{-7}$ МПа, что по отношению к геостатическому давлению составит $2 \cdot 10^{-8}$ % [6].

4. В модели, предлагаемой В. В. Тетельминым, радиус зоны деформируемости основания (в плане) принят 70 км (по обе стороны от плотины). Это вызывает серьезные сомнения, так как массивы скальных пород имеют зонально-блочное строение и их дополнительное нагружение приведет к частичному закрытию тектонических зон и трещин на расстояниях (в плане) порядка сотен метров — максимум первых километров. Данное обстоятельство служит источником дополнительных возражений по поводу модели земной коры в виде "шарнирно-опертой балки длиной $L = 2R = 140$ км".

5. Принятое постоянное значение вязкости магмы $\mu = 0,5 \cdot 10^{18}$ Па · с не обосновано. Как известно [7], оно варьируется в пределах 2 порядков при изменении температуры на 150 – 200 °С.

Затронем еще одну часть статьи, в которой В. В. Тетельмин искажает позицию других специалистов по рассматриваемым вопросам.

Автор утверждает, что его точку зрения "разделяют ведущие российские гидротехники Э. Г. Газиев и А. И. Савич", цитируя лишь начальную часть их текста и опуская самое существенное [8]: "Вряд ли состоятельна приводимая В. В. Тетельминым расчетная схема определения прогиба земной коры в виде балки на двух опорах, "плавающей в подкоровом субстрате горячей магмы". Вероятно, более правильно решать эту задачу, как это делалось другими исследователями [9, 10], посредством оценки деформации полупространства при приложении распределенной по площади нагрузки. В свете имеющихся результатов подобных исследований [9] представляется ошибочным предположение В. В. Тетельмина о столь значительной (до десятки

километров по глубине) области влияния плотины и водохранилища на земную кору, не говоря уже о верхней мантии. По опыту аналогичных исследований глубина зоны указанного влияния не превышает первых километров. Также спорным являются оценки роста арочных напряжений в плотине, сдвигение берегов и другие заключения автора, выполненные на основе анализа данных натурных наблюдений".

Подобный способ цитирования нельзя признать корректным.

В заключение повторим, что текст рецензируемой статьи носит скорее гипотетический, нежели доказательный характер и что многие её положения нуждаются в серьезном обосновании. Тем не менее, учитывая актуальность вопросов, поднятых в работе В. В. Тетельмина и связанных с адаптацией высоких плотин к окружающей среде, а также с их влиянием на последнюю, считаем возможным опубликовать данную статью в разделе "Дискуссии", снабдив комментарием по поводу того, что ее содержание не отражает точку зрения редакции журнала.

Список литературы

1. Гордон Л. А., Скворцова А. Е., Стефаненко Н. И. Анализ технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных измерений радиальных смещений и углов наклона горизонтальных сечений // Гидротехническое строительство. 2011. № 1. С. 7 – 15.
2. Гордон Л. А., Гутов С. С., Скворцова А. Е., Храпков А. А. Тангенциальные перемещения плотины и береговых примыканий Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных наблюдений // Гидротехническое строительство. 2011. № 7. С. 2 – 8.
3. Тетельмин В. В. Воздействие строительства крупных гидроузлов на изостатическое состояние земной коры // Гидротехническое строительство. 2009. № 11. С. 46 – 50.
4. Деменицкая Р. М. Кора и мантия Земли. — М.: Недра, 1967.
5. Болт Б. Землетрясения. — М.: Мир, 1981.
6. Воронков О. К. Основание Саяно-Шушенской ГЭС: строение, свойства, состояние // Гидротехническое строительство. 2010. № 7. С. 8 – 13.
7. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. — М.: Мир, 1969.
8. Газиев Э. Г., Замахаев А. М., Савич А. И. О проблеме "нестационарного состояния" плотины и скального основания Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2012. № 1. С. 45 – 47.
9. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). — М.: ИНЭК, 2005.
10. Гунта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. — М.: Мир, 1979.

Храпков А. А., доктор техн. наук,
Воронков О. К., доктор геол.-мин. наук
(ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева")

Рецензия 4

По мнению автора, прогиб земной коры под действием водохранилища и плотины может быть одной из причин многих необъясненных процессов, происходящих в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС. К числу таких процессов отнесены:

сокращение длины хорды арки плотины на отметке гребня с интенсивностью 0,44 мм/год за последние 12 лет наблюдений;

плановые смещения береговых секций, свидетельствующие о сближении берегов;

рост арочных сжимающих напряжений с интенсивностью 0,12 МПа/год.

При этом в качестве причин перечисленных явлений названы:

прогиб всей толщи земной коры в радиусе 70 км от места расположения гидроузла;

фильтрация в основании сооружения на глубинах до нескольких километров;

глубокое (до 500 м) охлаждение горных пород основания.

В вопросах поведения плотины, поднятых В. В. Тетельминым, выделим три момента:

достоверность данных наблюдений, характеризующих “сближение берегов”;

последствия, которые могут иметь место для сооружения;

возможные причины названного явления.

Необходимость рассмотрения первого вопроса связана с тем, что ряд специалистов отрицают кон-

вергенцию (сближение) берегов [1] по двум причинам. Во-первых, по их мнению, укорочение хорд верхних арок (если оно имеет место) должно было привести к уменьшению сжимающих напряжений в ключевых сечениях верхних арок со стороны напорной грани, что не подтверждается данными по напряжениям. Во-вторых, погрешность измерений длин хорд светодальномерами слишком велика, чтобы считать их достоверными. В частности, линейный тренд хронограммы длины хорды 0 – 67 за период с 09.09.1998 по 24.10.2010 показывает сближение берегов на 5 мм, что при погрешности 1,8 мм нельзя считать достоверным.

Однако приведенная аргументация неубедительна. Важным, в конце концов, является не столько количественный показатель укорочения хорд верхних арок, сколько тенденция, которую сформировавшийся тренд вполне определяет. Что касается отсутствия признаков влияния данного фактора на величину сжатия арочных поясов, то это в первом приближении означает наличие других, более значимых факторов, возможно, с обратными эффектами, определяющих характер распределения и величину арочных напряжений.

Для оценки процесса сокращения длины хорды арки на отметке гребня плотины В. В. Тетельмин использует в качестве показателя среднюю скорость изменения длины хорды. Такой показатель дает представление о направленности процесса, но

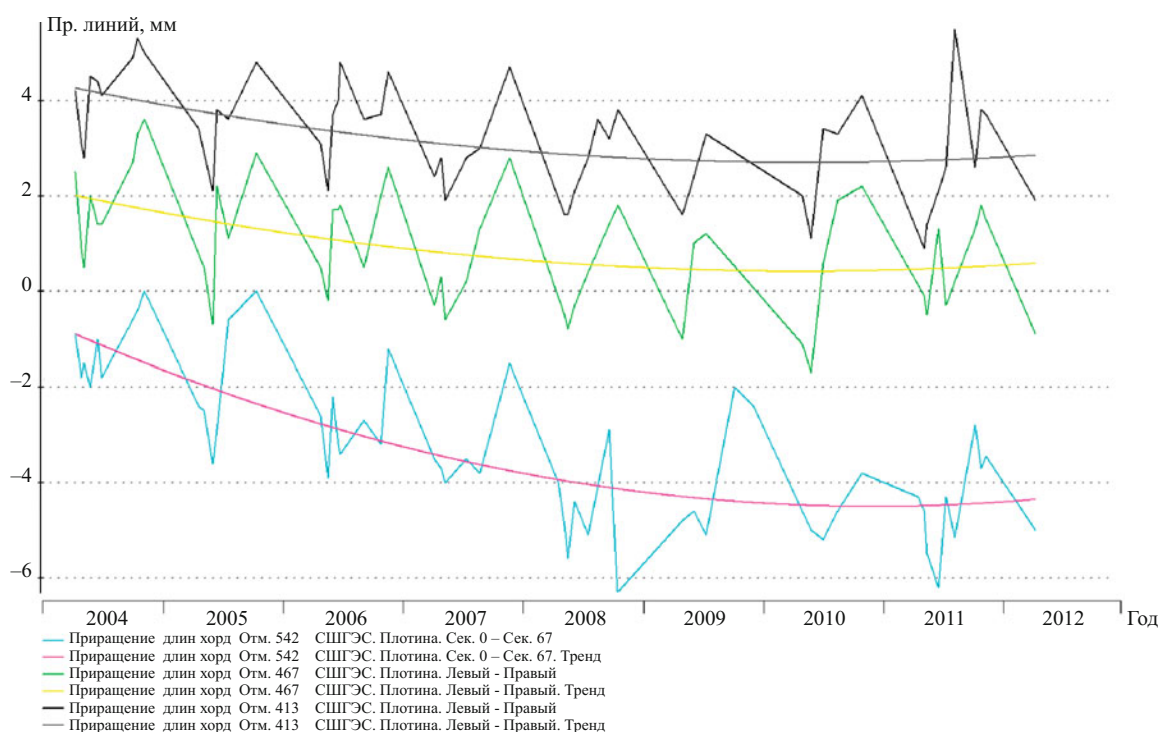


Рис. 1. Приращение длин хорд в период 2004 – 2012 гг.

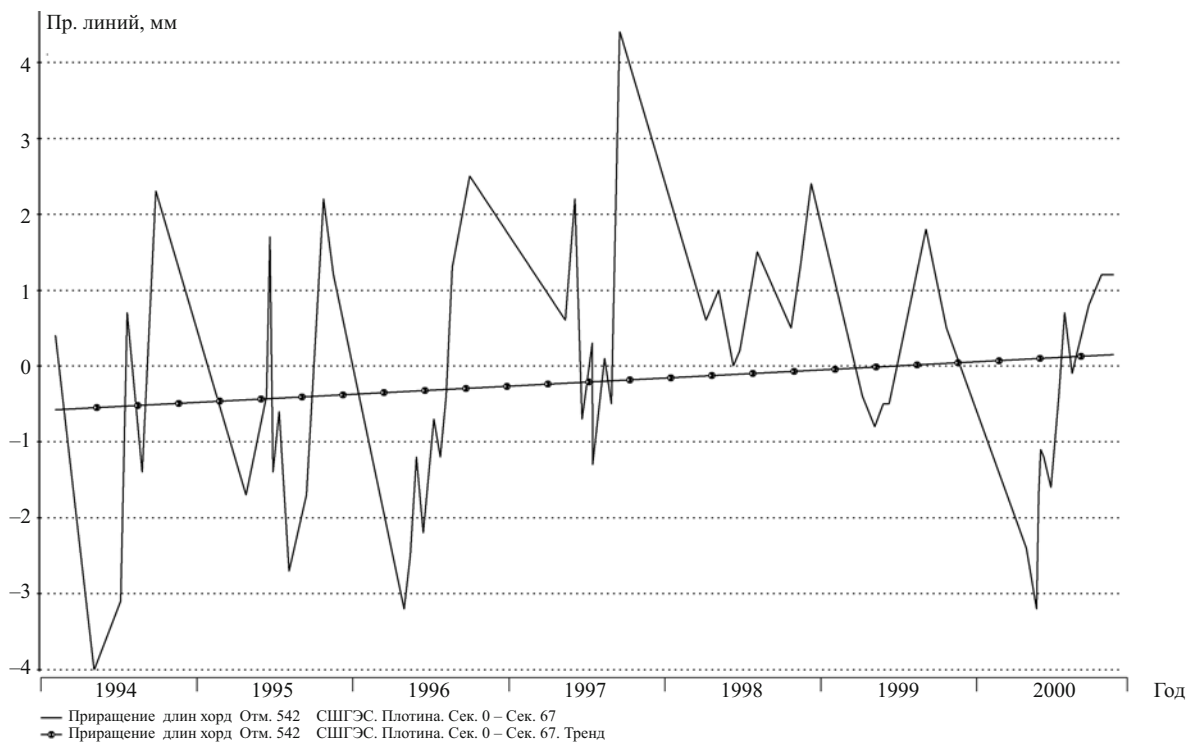


Рис. 2. Приращение длин хорд в период 1994 – 2000 гг., отм. 542 м

не позволяет судить об изменении интенсивности процесса во времени. Между тем при построении квадратичного тренда можно увидеть, что процесс так называемого “сближения берегов” носит не прогрессирующий, а затухающий характер на всех отметках измерений: 542; 467; 413 м (рис. 1).

Автор связывает необратимые процессы, протекающие в плотине, с прогибом земной поверхности от веса сооружения и воды в водохранилище. Сообразуясь с масштабом влияния указанного воздействия, охватывающего зону с $R = 70$ км, он ассоциирует плотину с материальной точкой, а само воздействие прикладывает к ней (точке) как сосредоточенную силу. При указанных предпосылках перемещение плотины, обусловленное опусканием

земной коры, практически можно рассматривать как движение абсолютно жесткого тела, не приводящее к созданию локальных эффектов в зоне верхних арочных поясов.

Относительно влияния фильтрации как возможной причины деструктивных процессов в плотине можно сказать, что этот фактор малозначителен для арочных плотин. Поэтому в зарубежной практике для указанных конструкций его вообще не учитывают при определении напряженно-деформирован-

Таблица 2

Арочные напряжения, МПа, в точках на оси радиальных сечений

Отметки, м	Дата	Секции		
		45	33	10
534,5	1.10.1990	-	- 7,5	- 4,7
	2004		- 8,7	- 5,9
	2012		- 8,9	- 6,0
504.0	1.10.1990	- 5,4	- 4,1	-
	2004	- 7,1	- 5,6	
	2012	- 6,6	- 6,5	
462.0	1.10.1990	-	-	- 8,3
	2004			- 9,5
	2012			- 9,8

Таблица 1

Арочные напряжения, МПа, на напорной и низовой грани

Отметки, м	Дата	Секции		
		45	33	10
534,5	1.10.1990	-	- 6,7/- 8,8	- 5,4/- 6,2
	2004		- 8,6/- 9,3	- 7,1/- 7,8
	2012		- 9,1/- 10,4	- 7,9/- 8,8
504.0	1.10.1990	- 6,5/- 5,5	- 9,7/- 6,3	- 5,2/- 6,0
	2004	- 8,8/- 6,9	- 11,8/- 8,0	- 6,6/- 6,7
	2012	- 9,2/- 7,8	- 12,1/- 8,6	- 7,5/- 7,5



Рис. 3. Приращение длин хорд в период 1997 – 2003 гг., отм. 542 м

ного состояния. В случае плотины СШГЭС из-за массивности конструкции, противодействия, действующего на подошву плотины, принимали во внимание. Однако каких-либо значимых изменений в показателях фильтрации под подошвой плотины после восстановления целостности цемзавесы в ходе ремонтных работ в 1998 – 2003 гг. выявлено не было.

Распространение зоны охлаждения основания на глубину до 500 м также не могло повлиять на состояние верхней части плотины. Многочисленные исследования показали, что активная зона основания, взаимодействующая с арочной плотиной СШГЭС в ходе ее нагружения гидростатической нагрузкой и при воздействии сезонных колебаний температуры внешней среды, не превышает 200 м по глубине.

Таким образом, факторы, названные В. В. Тетельминым, не могли стать причиной необратимых изменений в верхних арочных поясах плотины СШГЭС. Дело здесь в другом.

Как известно, наблюдения за изменениями длин хорд на отм. 542,0 м проводятся начиная с 1994 г., а на отм. 467,0 и 413,0 м — с 1998 г. Т. е. цикл измерений включает период 1996 – 2003 гг., в течение которого осуществлялось инъецирование трещин в теле плотины в зоне отм. 344,0 – 359,0 м и в основании, под превыми столбами плотины. Работы проводились при высоких УВБ 539,0 – 540,0 м, обеспечивающих максимальное раскрытие трещин. При сработке водохранилища заполнитель трещин

мешает их закрытию, что препятствует возврату плотины в положение, предшествующее началу работ. В процессе ремонтных работ, растянувшихся на годы, изменялись жесткостные характеристики конструкции, накапливались необратимые деформации. В результате размах радиальных смещений гребня плотины (секция 33) при сработке-наполнении водохранилища уменьшился с 90 – 95 до 70 – 75 мм. Вместе с тем изменился характер работы плотины и в арочном направлении.

Отметим, что до начала ремонтных работ по данным натурных наблюдений в плотине не было выявлено необратимых изменений в длине хорды арочного пояса на отметке гребня (рис. 2). В этот период повороты пятовых сечений арок проходили в условиях, когда зона раскрытия контактного шва в береговых примыканиях со стороны верхней грани распространялась до отм. 470,0 – 485,0 м с глубиной раскрытия до 16 м на нижних отметках плотины. В ходе инъецирования в бетон и основание русловых секций увеличивалась жесткость опирания плотины на основание и соответственно уменьшались углы поворота пятовых сечений арочных поясов в процессе нагружения, что вело к сокращению длин их хорд (рис. 3).

Таким образом, “сближение берегов” в действительности отражает изменение в схеме деформирования арочных поясов после инъецирования, ведущее к укорочению длин хорд арочных поясов со стороны низовой грани плотины.

Также ошибочно процесс “сближения берегов” связывать с ростом арочных и консольных напряжений в плотине (табл. 1), как это справедливо отмечает В. А. Рассказчиков [2]. По его мнению, напряжения в поверхностных слоях бетона возникают за счет набухания бетона у напорной грани и контракционной усадки бетона у низовой грани. При этом рост величины напряжений оценивается им в пределах 1,8 – 2,5 МПа. С этим можно согласиться отчасти для зоны отметок напорной грани, постоянно находящихся в контакте с водой. Что касается верхних отметок плотины, в зоне переменного уровня воды, то здесь, с нашей точки зрения, рост напряжений в основном имеет температурное происхождение.

Как известно, появление водохранилища повлияло на климатические условия района расположения гидроузла. Среднегодовая температура увеличилась на 4 °С. В случае статически неопределимой конструкции, каковой является арочно-грави-

тационная плотина СШГЭС, это ведет к появлению дополнительного сжатия. При конструкционном модуле плотины $3,7 - 4,3 \cdot 10^4$ МПа рост сжимающих арочных напряжений может составить 1,4 – 1,5 МПа, что соответствует данным табл. 2, приведенным для внутренних точек плотины. При этом, как следует из табл. 1, на вклад влажностных напряжений на напорной грани верхних арочных поясов остается 0,8 – 1,0 МПа, что в общем соответствует величине напряжений от внутренней диффузии, составляющей 0,9 МПа, согласно [2].

Список литературы

1. *Гордон Л. А., Гутов С. С., Скворцова А. Е.* и др. Тангенциальные перемещения плотины и береговых примыканий Саяно-Шушенской плотины по данным натурных наблюдений // Гидротехническое строительство. 2011. № 7. С. 2 – 8.
2. *Рассказчиков В. А.* Влажностные изменения в бетоне Саяно-Шушенской плотины и их влияние на напряженно-деформированное состояние сооружения // Гидротехническое строительство. 2012. № 4. С. 7 – 19.

Вульфович Н. А., кандидат техн. наук (ОАО “Ленгидропроект”)

О влиянии Саяно-Шушенской ГЭС на геодинамические процессы в земной коре

Савич А. И., доктор физ.-мат. наук,
Речицкий В. В., кандидат технических наук (ЦСГНЭО)

Приведены результаты исследований влияния Саяно-Шушенской ГЭС на геодинамические процессы в земной коре.

Ключевые слова: Саяно-Шушенская ГЭС, геодинамические процессы, земная кора, влияние водохранилища, техногенные нагрузки, воздействие воды, землетрясения.

Известно, что строительство и эксплуатация крупных ГЭС, к которым, безусловно, относится и Саяно-Шушенская гидроэлектростанция, с большими и глубоководными водохранилищами оказывают заметное влияние на геодинамические процессы в локальных участках земной коры [1, 2]. В результате развития этих процессов в зонах влияния гидротехнических объектов происходят деформации дневной поверхности, изменяются гидрогеологические условия и напряженное состояние верхних частей земной коры [2, 3], активизируются сейсмические процессы [1, 2, 4]. Интенсивность и специфика влияния различных ГЭС на указанные процессы во многом определяются локальными природными условиями, а также масштабом и характером техногенного воздействия на геологическую среду.

Считается, что основными техногенными факторами, обуславливающими развитие различных геодинамических процессов, являются “рост упругих напряжений под влиянием нагрузки от водохранилища и сооружения, увеличение давления в подстилающих породах, связанное с деформацией пор и с фильтрацией воды, снижением прочности пород при их взаимодействии с водой и последующим разрушением пород при абсорбции флюидов, с уменьшением трения между блоками в связи с проникновением воды в межблочные промежутки, увеличение уровня подземных вод, эффект Ребиндера” [2, стр. 79; 1, 5]. Определенное влияние на характер развития этих процессов оказывают также вибрационные воздействия, вызываемые эксплуатацией гидроэлектростанций [2, 4]. В настоящее время среди исследователей нет серьезных разногласий относительно общих причин, обуславливающих активизацию геодинамических процессов на участках крупных ГЭС, однако имеются значительные различия в оценке характера воздействия этих объектов на вмещающую геологическую среду. Дискуссионным при этом является определение размеров области и, особенно, глубины влияния перечисленных выше факторов, которая, по мнению разных исследователей, изменяется от первых километров [1, 2] до границ верхней мантии, т.е. до глубин по-

рядка 50 км [6]. Очевидно, что характер проявления указанных факторов на участках с различным геологическим строением и геодинамическими условиями может существенно различаться.

Для оценки размеров зон и специфики воздействия на геологическую среду техногенных факторов, связанных с созданием и эксплуатацией крупных ГЭС, в настоящее время используются подходы, базирующиеся на данных как экспериментальных, так и численных исследований [1, 7–10]. Исходя из результатов этих работ, оценим возможное влияние Саяно-Шушенской ГЭС на геодинамические процессы в земной коре.

Оценка влияния техногенных нагрузок

Наибольшие результаты среди численных исследований достигнуты при изучении влияния дополнительной нагрузки, обусловленной весом воды в водохранилище. В работах этого направления, первые из которых относятся к сороковым годам прошлого столетия [7], основное внимание уделяется оценке величины прогиба дневной поверхности (дна водохранилища), а также изучению величины и характера распределения техногенных напряжений в приповерхностных частях земной коры под действием дополнительных техногенных нагрузок [1, 8]. Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что при создании искусственных водохранилищ поверхность земной коры прогибается, причем размеры области проявления и величина прогиба зависят как от площади, конфигурации и глубины водохранилища, так и от геологических и геоморфологических особенностей нагруженного участка земной коры. Как правило, на дневной поверхности эти деформации проявляются в зоне, соизмеримой с несколькими поперечными размерами (ширинами) водохранилищ, а максимальные прогибы дна, обычно приуроченные к наиболее глубоким частям водохранилища, не превышают первых десятков сантиметров [1, 10]. Полученные при расчетах данные о деформациях дневной поверхности во многих случаях хорошо согласуются с результатами прямых геодезических измерений [1, 9], что свидетельствует о достаточно

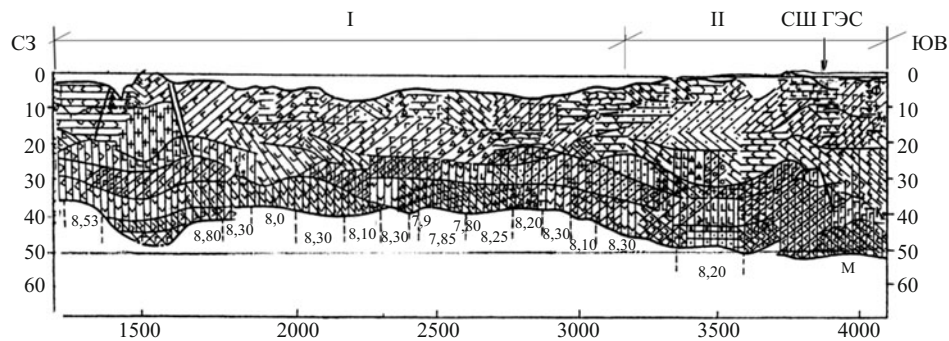


Рис. 1. Разрез земной коры в районах Западно-Сибирской плиты (I) и Алтае-Саянской складчатой области (II) по данным сейсмических исследований по геотраверсу г. Мурманск — г. Кизил [12]. Различной штриховкой выделены блоки земной коры, характеризующиеся различными скоростями упругих волн и разной плотностью. Цифрами указаны скорости продольных волн (км/с) в породах ниже границы Мохоровичича (М). Стрелкой отмечено положение СШГЭС

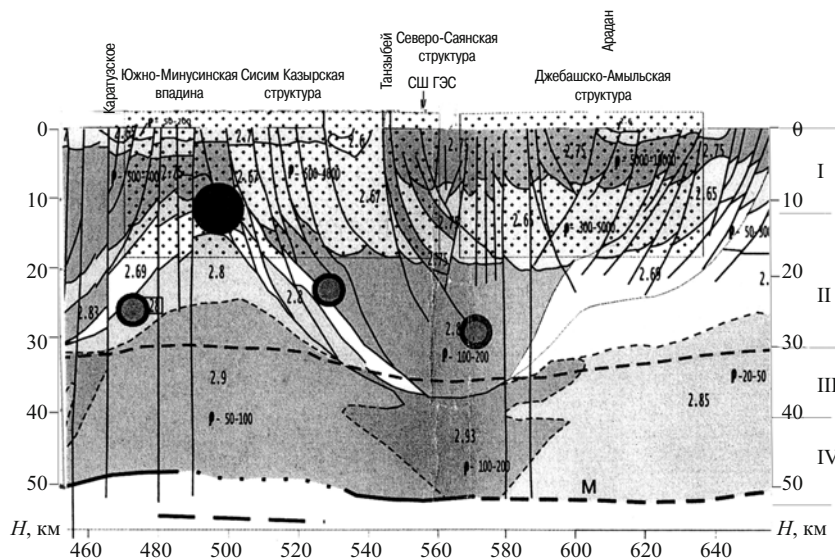


Рис. 2. Разрез земной коры в районе СШГЭС по данным работы [14]:

I — верхнекоровый гранито-метаморфический мегакомплекс (структурно-вещественные комплексы различных этапов развития ЛССО); II — среднекоровый мегакомплекс (мегакомплексы пород основного и среднего состава в амфиболитовой фации метаморфизма); III — нижнекоровый мегакомплекс (мегакомплексы пород основного состава в гранулитовой фации метаморфизма); М — поверхность Мохоровичича; IV — породы верхней мантии; 2.9 — показатель плотности пород, г/см³; ● — проекции на профиль гипоцентров близких землетрясений

высокой их достоверности. В ряде численных исследований, например в работе [10], показано, что при прогибании дна водохранилища отмечается определенное схождение склонов долины (ущелья), которое может обусловить некоторое обжатие верхних частей плотин.

Результаты изучения напряженного состояния приповерхностных (внутренних) частей земной коры на участках крупных глубоководных водохранилищ менее достоверны и существенно зависят как от структурных особенностей конкретного участка, так и от принятой в расчетах модели деформирования. Так, на основании численных исследований трехмерной упругой модели участка земной коры в зоне водохранилища Кариба, включающего разлом Бинга, установлено, что наибольшие сдвиговые напряжения $\tau_{\max} \approx 2,12$ бара отмечаются на глубинах порядка 5 км, где дополнительная вели-

чина $\sigma_z \approx 6,68$ бара [9]. Подобные результаты приведены и в работе [1] для водохранилища Койна. Аналогичные исследования на трехмерной дискретной модели блока земной коры на участке Ингурской ГЭС показали, что техногенные “нормальные и касательные напряжения с глубиной уменьшаются и на поверхности, проходящей на отметке 1500 м* от уровня моря, равняются нулю” [10].

Существенно иные оценки размеров области влияния водохранилища СШГЭС приводятся в работе [6]. Автор этой работы, рассматривая земную кору в виде упругой оболочки, лежащей на вязком основании (верхней мантии), и решая плоскую задачу деформирования этой системы под действием дополнительной нагрузки, приходит к выводу о

* Это соответствует глубинам от дневной поверхности *~* 1800 – 2000 м.

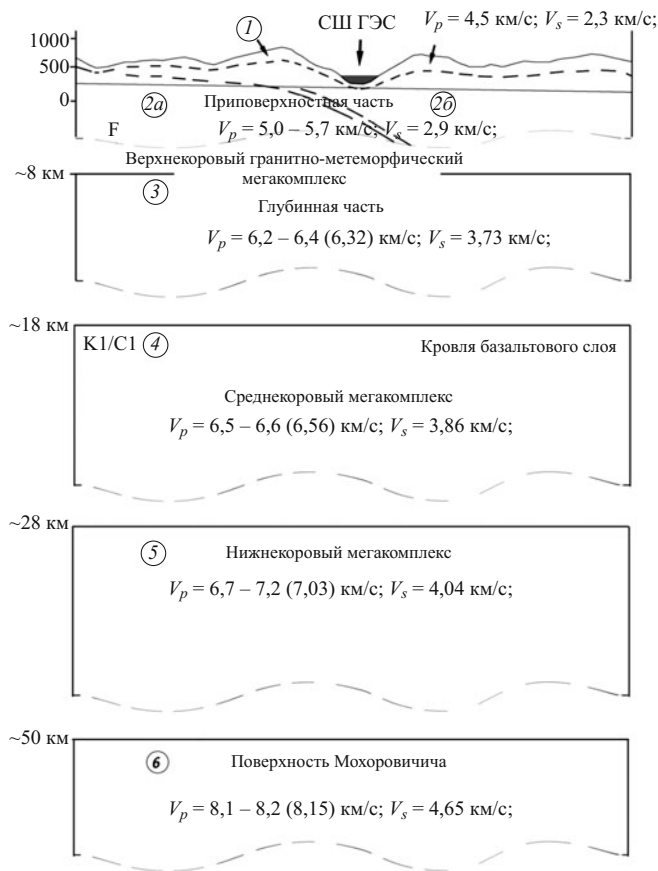


Рис. 3. Модель земной коры на участке СШГЭС

том, что влияние нагрузки, обусловленной созданием СШГЭС, распространяется до глубин верхней мантии, т.е. до глубин более 50 км, и обуславливает прогиб дневной поверхности приблизительно на 1,0 – 1,3 м. Согласно [6] “строительство СШ-гидроузла нарушило изостатическое равновесие литосферы, отчего земная кора под действием техногенной нагрузки прогибается, а чаша прогиба распро-

страняется в стороны от водохранилища на десятки км” [6, стр. 71]. Для суждения о достоверности этих выводов сопоставим принятую в указанной работе расчетную модель с существующими данными о строении и свойствах земной коры в районе СШГЭС.

Исходную информацию о строении земной коры в районе СШГЭС можно получить на основании обобщения результатов комплексных сейсмических исследований на региональных геотраверсах, изложенных в целом ряде публикаций в частности в работах [11 – 13]. На рис. 1 приведен фрагмент сейсмологического разреза по геотраверсу г. Мурманск — г. Кизил, отражающий специфику глубинного строения района расположения СШГЭС. Судя по этому разрезу, земная кора в исследуемом регионе имеет сложное слоисто-блоковое строение и мощность около 50 км. Более детальный разрез, взятый из работы [14] и приведенный на рис. 2, четко отображает деление коры на три основных слоя, верхний из которых носит название верхнекорового гранитно-метаморфического комплекса, средний — среднекорового мегакомплекса и нижний — нижнекорового мегакомплекса [11, 14]. Породы в указанных комплексах различаются своей плотностью, а также показателями упругих и прочностных свойств. На основании обобщения имеющихся материалов нами составлена упрощенная схема (модель) участка земной коры в районе СШГЭС и оценены физико-механические свойства слагающих её пород. Эти данные представлены на рис. 3 и в таблице. Сопоставляя изложенную информацию с представлениями о строении земной коры, принятыми автором работы [6], необходимо отметить их значительные отличия, наиболее существенными из которых являются:

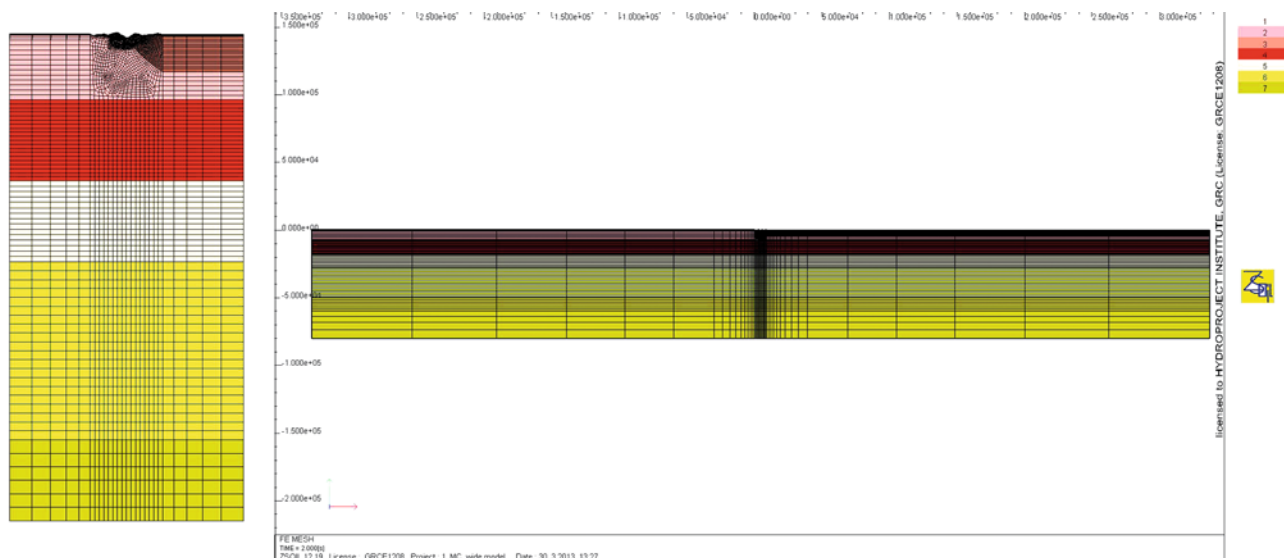


Рис. 4. Расчетные модели основания водохранилища СШГЭС

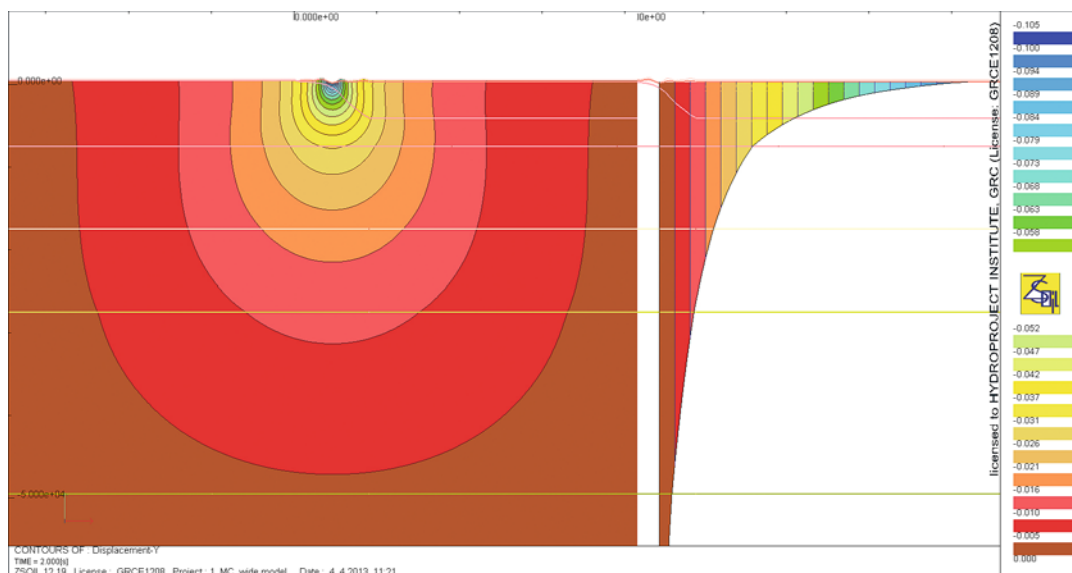


Рис. 5. Изополя вертикальных деформаций основания, м, и их распределение по глубине

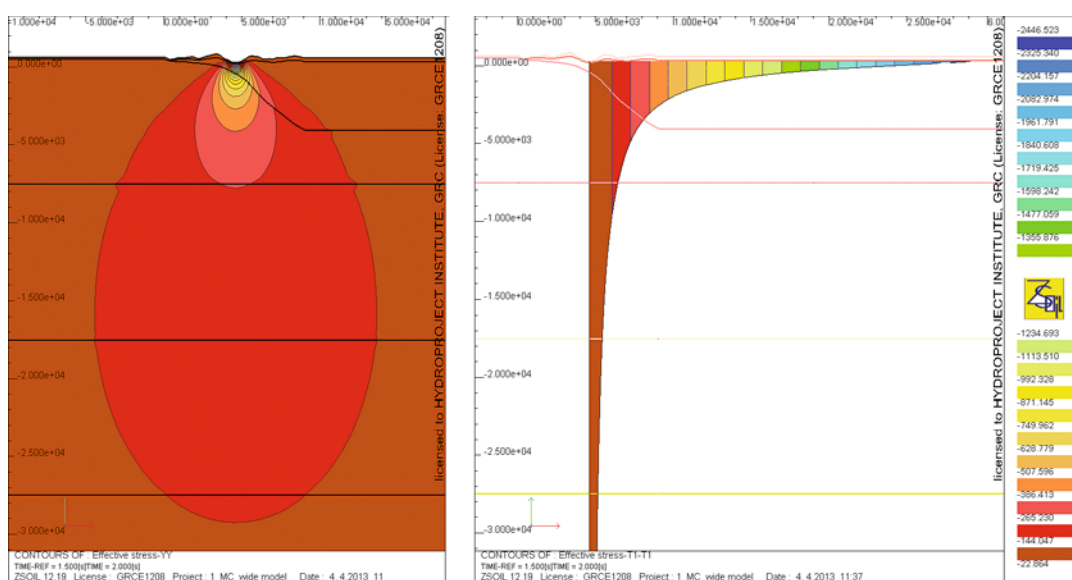


Рис. 6. Приращение вертикальных напряжений в основании, kN/m^2 , и их распределение по глубине

невозможность аппроксимации земной коры, имеющей сложное слоисто-блоковое строение, однородным слоем;

необоснованность отождествления В. В. Тетельминым вещества верхней мантии с тяжелой вязкой жидкостью. Согласно экспериментальным данным породы верхней мантии характеризуются высокими значениями скоростей не только продольных, но и поперечных упругих волн. Следовательно, эти породы не обладают значительной вязкостью и поэтому оценки изостатического равновесия литосферы, сделанные в работе [6], ошибочны.

Существенные возражения вызывает также принятая автором работы [6] схема расчета.

Исходя из изложенного, нами выполнена серия расчетов для оценки возможного влияния дополни-

тельных техногенных нагрузок, обусловленных созданием водохранилища СШГЭС, на изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры. Для решения этой задачи в качестве расчетной модели была принята упрощенная инженерно-геологическая модель скального основания глубиной до 60 км, в которой выделено семь зон с различными физико-механическими характеристиками. Расчетный разрез основания представлен на рис. 4, а характеристики слагающих его пород — в таблице.

Определение НДС основания водохранилища СШГЭС выполнено численным методом в плоской постановке с применением лицензионного программного комплекса Z SOIL 2012 [15], реализующего метод конечных элементов. Для описания

прочности слагающих основание скальных пород использовался критерий разрушения Кулона — Мора.

Решение задачи осуществлялось в два этапа. На первом — моделировалось формирование естественных напряжений в массиве основания, на втором — прикладывалась нагрузка от веса воды на ложе водохранилища. После первого расчетного этапа деформации основания, вызванные его собственным весом, обнулялись. Объемный вес воды принимался равным 1 т/м^3 , отметка воды в водохранилище соответствовала максимальной отметке 547,0 м, при превышении которой начинается перелив воды через гребень плотины. Абсолютная отметка дна водохранилища принята равной 300 м.

Анализ первых результатов расчета показал, что представленное на рис. 4, а соотношение начальных вертикальных и горизонтальных размеров расчетной модели ($\sim 1:5$) не позволяет исключить влияние на НДС массива вертикальных границ области. Для получения более корректных результатов было принято решение рассмотреть два варианта расчетных моделей, различающихся их шириной, и сопоставить соответствующие результаты численных расчетов. На рис. 4, а, б представлено

два вида расчетных моделей размерами 29×60 и 660×80 км по ширине и высоте соответственно. В первом случае максимальная осадка дна водохранилища получилась равной 11,1 см, во втором — 10,5 см, что является весьма близкими результатами. Единственным существенным различием явилась невозможность по первой модели определить границу зоны влияния водохранилища в горизонтальном направлении из-за ее ограничения по ширине. В связи с этим представленные ниже результаты расчета НДС относятся только ко второй модели размером 660×80 км.

Результаты расчета НДС в виде изополей вертикальных перемещений основания и приращения вертикальных напряжений, вызванного весом водохранилища, представлены на рис. 5–7. Детальное изучение кривых распределения осадок и дополнительных напряжений показало, что вертикальные деформации основания затухают до уровня 5 % от максимальной осадки ложа водохранилища (до значения 5 мм) на расстоянии около 35 км от водохранилища. Максимальное дополнительное вертикальное напряжение составляет 2,4 МПа. Область распространения дополнительных вертикальных

Показатели физико-механических свойств различных структурных элементов земной коры на участке створа плотины СШГЭС

Номер слоя	Характеристика слоя		Мощность слоя, км	Показатели физико-механических свойств							Глубина подошвы слоя, км
				V_p , км/с	V_s , км/с	μ	ρ , г/см ³	E_g , 10 ³ МПа	E_c , 10 ³ МПа	E_y , 10 ³ МПа	
1	Верхнекоровый гранито-метаморфический комплекс	Зона выветривания и разгрузки	0,1 – 0,3	4,50	2,54	0,265	2,65	43,3	36,0	26,0	0,3
2а		Приповерхностная часть гранитного комплекса	8,0	5,24	2,90	0,279	2,75	59,2	51,4	37,0	8,3
2б		Приповерхностная часть метаморфического комплекса		5,85	3,10	0,284	2,70	67,7	59,9	44,0	8,3
3		Глубинная часть верхнекорового комплекса	10,0	6,32	3,73	0,233	2,75	94,3	87,5	65,0	~ 18,0
4	Среднекоровый мегакомплекс		18,0	6,55	3,86	0,234	2,89	103,0	96,7	80,0	~ 36,0
5	Нижнекоровый мегакомплекс		16,0	7,03	4,04	0,253	2,93	119,9	115,0	100,0	~ 52,0
6	Верхняя мантия	~ 100,0	8,15	4,65	0,259	3,25	177,0	172,0	~ 165,0		

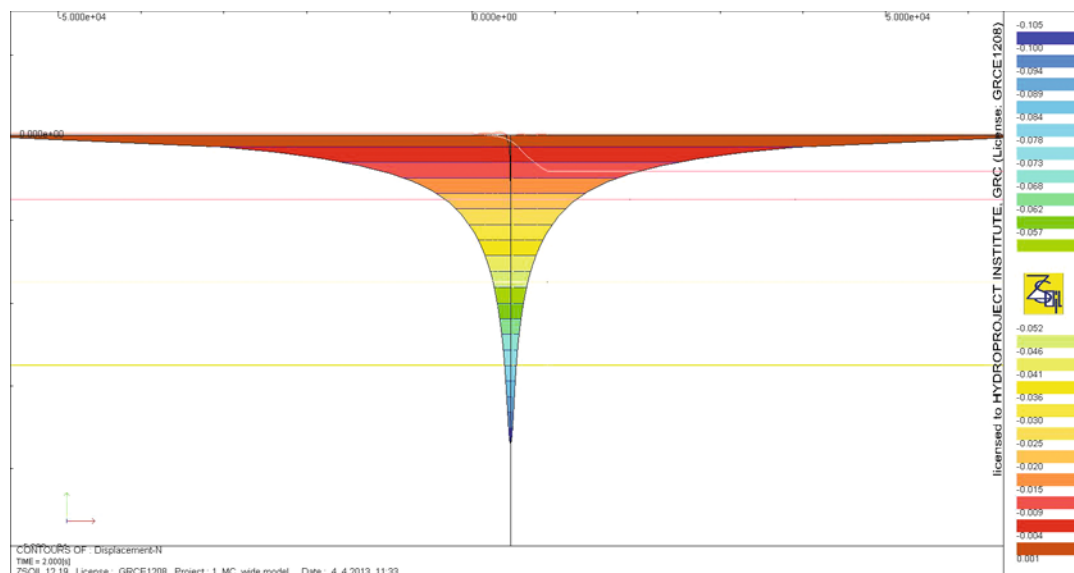


Рис. 7. Распределение вертикальных осадок поверхности, м, по ширине основания

напряжений, превышающих 0,1 МПа ($\sim 1 \text{ кг/см}^2$), развивается в массиве основания на глубину до 14,5 км.

Приращение касательных напряжений в основании, вызванное весом водохранилища, показано на рис. 8.

Осадка ложа водохранилища закономерно приводит к горизонтальным смещениям берегов каньона. Общее схождение берегов, согласно результатам выполненного расчета, на отн. 750 – 800 м составляет 34 мм и на уровне гребня плотины (отн. 540,0 м) не превышает 24 мм. Изополя горизонтальных перемещений основания представлены на рис. 9.

По результатам выполненных численных исследований можно сделать следующие выводы:

осадка ложа водохранилища СШГЭС, вызванная весом воды, составляет 10,5 см;

взаимное схождение берегов каньона от веса водохранилища на уровне гребня плотины достигает 24 мм;

границы зоны влияния водохранилища на напряженно-деформированное состояние земной коры, определенные в соответствии с принятыми в данной работе критериями, распространяются в массиве на глубину до 14,5 км и в стороны от водохранилища на расстояние до 35 км;

полученные расчетным способом границы зоны влияния водохранилища определены в предположении работы основания как сплошной среды. Вполне вероятно, что более детальный учет структурных особенностей исследуемого участка земной коры (представление его в виде блочно-контактной среды) и существующих здесь тектонических нарушений привел бы к существенному уменьшению размеров зоны влияния водохранилища СШГЭС.

Оценка влияния других факторов

Из совокупности перечисленных выше факторов, связанных с созданием глубоководных водохранилищ, наибольшее влияние на развитие геодинамических процессов вслед за техногенной нагрузкой оказывает воздействие воды, просачивающейся в массивы горных пород и изменяющей как их напряженное состояние, так и физико-механические свойства [1, 2, 3 и др.]. В районах со сложными климатическими условиями заметное влияние на динамику этих процессов оказывает также температурный режим в зоне расположения объекта [5, 6]. К сожалению, по ряду причин аналитическая оценка воздействия этих факторов на развитие геодинамических процессов на участках крупных ГЭС на сегодняшний день практически невозможна и поэтому основные сведения о сфере и характере их влияния пока получают на основании режимных (долговременных) натурных наблюдений, результаты которых отражают изменение свойств и состояния геологической среды в процессе создания и эксплуатации крупных ГЭС. С некоторой условностью указанные исследования можно разделить на приповерхностные и глубинные, отличающиеся спецификой и составом получаемых данных.

Результаты исследований первого типа отражают процессы, происходящие в приповерхностной части земной коры в непосредственной близости от объектов. Имеющиеся данные свидетельствуют, что при этом происходит перестройка гидрогеологического режима в зоне влияния водохранилища и вследствие развития дополнительных взвешивающих (архимедовых) сил изменяется напряженное состояние верхних частей разреза [1 – 3, 5]. Отмечаются также определенная изменчивость физико-механических свойств скальных пород и усиле-

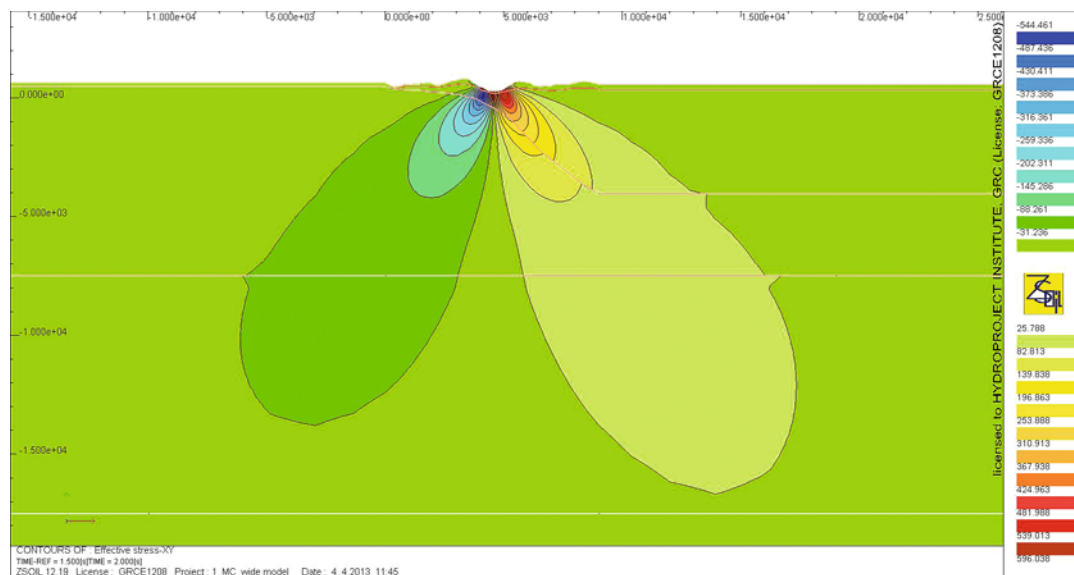


Рис. 8. Приращение касательных напряжений в основании, кН/м^2

ние интенсивности некоторых экзогенных процессов [2, 16]. Все эти эффекты в той или иной степени проявляются и на участке СШГЭС [5, 17, 20], причем на характер и интенсивность их развития определенное влияние оказывают вибрационные воздействия, создаваемые как работой гидроагрегатов и водосброса [5, 6, 20], так и режимом наполнения — сработки водохранилища [16, 17]. Вследствие существующей изменчивости физико-механических свойств и структурной неоднородности приповерхностных частей земной коры отмечается неравномерность пространственного распределения и интенсивности проявления рассматриваемых эффектов.

Отмеченные обстоятельства определяют необходимость локализации мест наиболее интенсивного проявления геодинамических процессов, провоцируемых обсуждаемыми факторами, а также непрерывного контроля за их развитием во времени [3, 5, 16]. При этом следует учитывать, что вода, просочившаяся в трещины, может оказывать отрицательное влияние на несущую способность высоких плотин, обуславливая снижение вертикальных напряжений в массиве за счет их дополнительного взвешивания при заполнении водохранилища при одновременном увеличении сдвиговых нагрузок и ухудшении прочностных свойств пород в сдвигопасных зонах [1, 3, 16]. Указанные эффекты, в частности, были зафиксированы и в массиве пород основания плотины СШГЭС [17]. По данным повторных измерений напряженного состояния левобережного примыкания этой плотины при двух различных уровнях верхнего бьефа (водохранилища) было установлено, что при подъеме верхнего бьефа на 34 м происходит уменьшение сжимающей вертикальной компоненты напряжений в массиве с

3,0 – 3,5 МПа приблизительно на 1,5 МПа, в то время как минимальная горизонтальная компонента, ориентированная вдоль склона, увеличивается с 2,7 – 4,4 до 3,4 – 5,8 МПа, т.е. на 0,7 – 1,4 МПа. При этом наблюдается некоторое разуплотнение массива, сопровождаемое уменьшением скоростей упругих волн, а также снижение показателей прочности массива на разрыв [3, 17].

Динамика указанных процессов существенно зависит от степени водопроницаемости массива пород в основании сооружения, а также от глубины и скорости сработки уровня водохранилища. Установлено, что если скорость сброса воды из водохранилища выше скорости отжатия воды, аккумулятивной трещинами, то в занаторенных трещинах возникает избыточное трещинное давление и наиболее крупные из них могут расти. Такие эффекты, отмеченные на ряде гидротехнических объектов, в частности в основании высотной арочной плотины Ингури ГЭС в западной Грузии [16], приводят к ухудшению показателей упругих и прочностных свойств и, следовательно, снижению несущей способности скальных оснований крупных гидросооружений.

Сведения о глубинных геодинамических процессах, связанных с созданием и эксплуатацией больших и глубоководных водохранилищ и обусловленных влиянием второй группы факторов, получают преимущественно на основании изучения возбужденной или наведенной сейсмичности. Анализ имеющейся информации о подобных сейсмических явлениях свидетельствует, что очаги “наведенных” землетрясений приурочены преимущественно к глубинам до 10 – 15 км [2, 4], причем основная их часть расположена на глубинах в 2 – 7 км [1, 2]. Исключение из этого правила составляют очаги

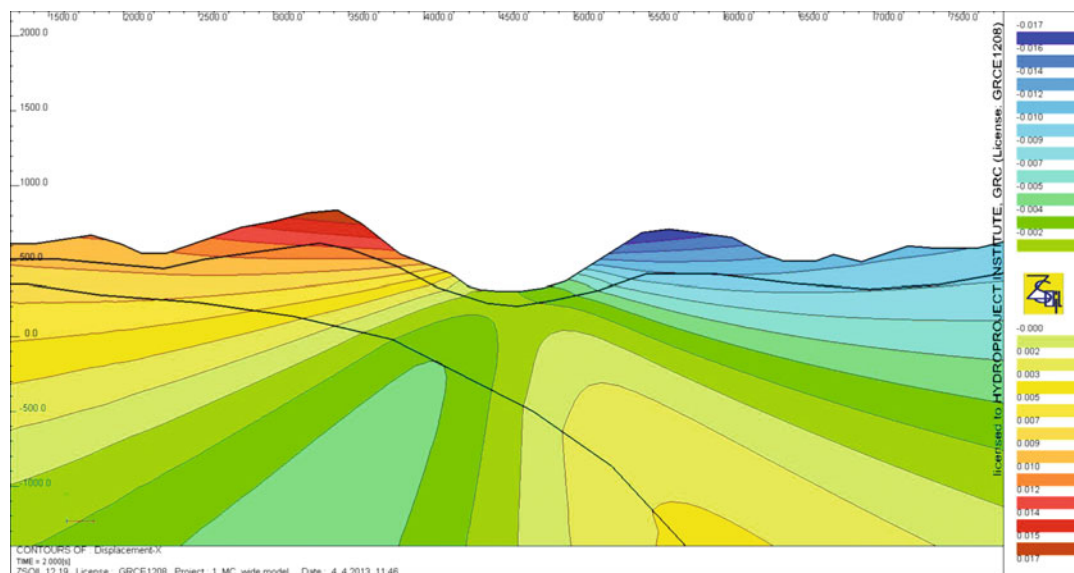


Рис. 9. Изополя горизонтальных перемещений основания, м

тектонических землетрясений с большими глубинами, для которых изменения в состоянии геологической среды, связанные с созданием водохранилищ, служат лишь спусковым механизмом [2, 4]. Судя по опубликованным экспериментальным данным, совокупность техногенных факторов, обусловленных созданием глубоководных водохранилищ, исключая эффекты пригрузки, проявляется на площади, приблизительно на порядок превосходящую площадь водохранилища [1, 4], причем область их влияния сильно зависит от конкретных структурно-тектонических условий районов расположения гидротехнических объектов [1, 2].

Благодаря наличию в Алтае-Саянском регионе довольно плотной сети региональных сейсмических станций, в том числе станций, расположенных в зоне влияния водохранилища СШГЭС [18, 19], имеется достаточно надежная исходная сейсмологическая информация, позволяющая судить об общем влиянии водохранилища на сейсмический режим района ГЭС. В подтверждение этого на рис. 10 приведены данные о количестве и пространственном распределении эпицентров землетрясений с магнитудой более 0,6 в окрестности СШГЭС за период с 1962 по 2010 г. **. Судя по этим данным, в зоне радиусом в 100 – 150 км от плотины за весь период наблюдений не произошло никаких существенных изменений ни в количестве, ни в энергии зарегистрированных сейсмических событий. Некоторым исключением из сказанного является землетрясение с $M = 5,3$, произошедшее в Красноярском крае 10 февраля 2011 г. Очаг этого землетрясения находился на глубине около 15 км и, согласно

имеющимся данным, был приурочен к зоне Большопорожского разлома, которая и ранее рассматривалась как одна из наиболее вероятных зон ВОЗ (возможных очагов землетрясений) для района СШГЭС [20]. Учитывая, что рассматриваемое землетрясение произошло на относительно небольшом удалении от водохранилища, которое пересекает Большопорожский разлом, с определенной долей вероятности можно предполагать, что оно связано с созданием этого водохранилища, вызвавшего дополнительное замачивание зоны разлома. Если принять это предположение, то очевидно, что при возникновении землетрясения такой магнитуды влияние водохранилища могло проявиться лишь в виде некоторого “спускового механизма”, спровоцировавшего разрядку накопившихся тектонических напряжений. Поскольку согласно [18, 19] очаги большинства более слабых землетрясений, выделенных в пределах 100 – 150 км от плотины СШГЭС, приурочены также к глубинам порядка 15 км и более, то, по-видимому, и они не связаны с зоной влияния рассматриваемых техногенных факторов. К сожалению, из-за отсутствия в районе ГЭС локальной сейсмологической сети нет информации о глубинах очагов более слабых землетрясений и о пространственно-временном распределении в зоне влияния водохранилища землетрясений с $M < 0,6$. Судя по имеющимся публикациям [1, 2, 4], эти данные могли бы существенно уточнить степень влияния ГЭС на геодинамический режим верхних частей земной коры в зоне водохранилища.

Однако поскольку таких данных нет, то по совокупности имеющейся информации можно считать, что создание и многолетняя эксплуатация водохранилища СШГЭС не вызвали в зоне своего влияния

** График построен А. А. Годзиковской и Н. Е. Прибыловой по данным работ [18, 19].

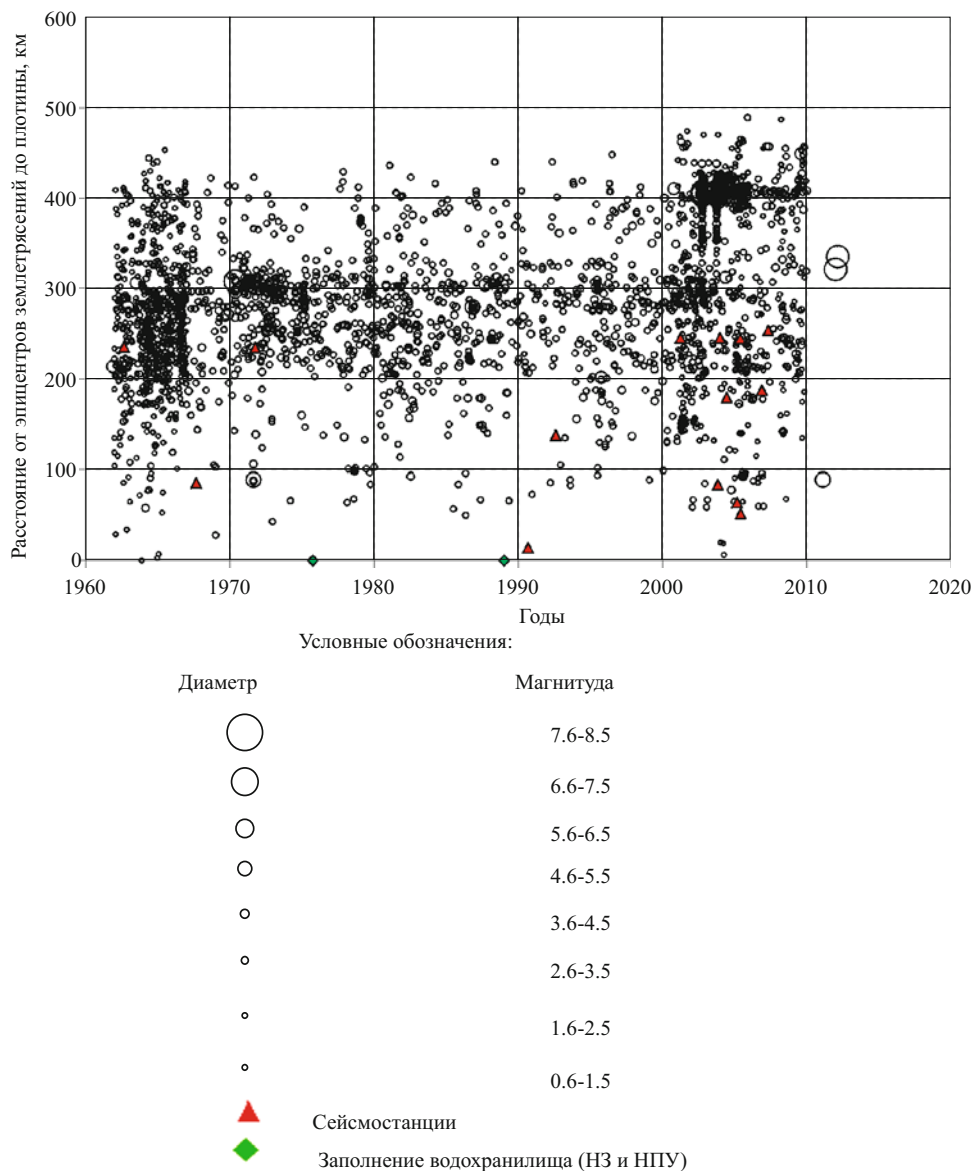


Рис. 10. Хронологическое распределение эпицентров землетрясений в районе Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от расстояния до плотины с учётом величины магнитуды за весь период исследований.

явных изменений в пространственно-временном распределении землетрясений с $M \geq 0,6$.

Выводы

Обобщая изложенное, можно сделать следующие выводы относительно влияния водохранилища СШГЭС на геодинамические процессы в земной коре:

1. Судя по имеющимся экспериментальным данным и результатам расчетных исследований, создание и эксплуатация глубоководного водохранилища СШГЭС вызвали определенное изменение физико-механических свойств и напряженного состояния земной коры в зоне своего влияния. Ширина этой зоны приблизительно равна 60 – 70 км (\approx по 30 км от границ водохранилища), а её мощность (глубина) не превышает 15 км.

2. За прошедшие после наполнения водохранилища 25 лет в зоне его влияния не произошло никаких заметных геодинамических явлений, связанных с глубинными процессами. Это свидетельствует о слабом влиянии водохранилища СШГЭС на глубинные процессы в земной коре.

3. Наиболее заметно влияние водохранилища проявляется в приповерхностных частях указанной выше зоны, обуславливая при этом развитие разнообразных и часто разнонаправленных геодинамических процессов. К числу последних можно отнести:

прогиб ложа водохранилища под действием дополнительных техногенных нагрузок, вызывающих определенное уплотнение верхних частей массива. Этот процесс сопровождается разуплотнением тех же частей массива вследствие проявления взвешива-

вающих (архимедовых) сил при подъеме уровня водохранилища;

схождению берегов вследствие прогиба dna водохранилища противостоит их “развал” под действием арочных напряжений от плотины. Из-за неравномерности протекания этих процессов на участках право и левобережных примыканий плотины создается кажущееся впечатление “навала” одного берега на другой, что, в частности, отмечается в работе [5];

снижение показателей прочностных свойств массива в результате его замачивания и разуплотнения сопровождается их повышением при дополнительном обжатии и уплотнении массива.

Исходя из изложенного, очевидно, что СШГЭС с глубоководным водохранилищем не оказывает никакого существенного влияния на развитие глубинных геодинамических процессов в зоне своего влияния. В связи с этим для обеспечения безопасности работы СШГЭС необходимо акцентировать внимание на выявлении пространственно-временных особенностей развития геодинамических процессов в приповерхностной части земной коры на участке гидроузла, а также на разработке способов прогнозирования мест и времени возникновения опасных для сооружения возможных геодинамических явлений.

Список литературы

1. Гунта Х., Расточи Б. Плотины и землетрясения. — М.: Мир, 1979. 251 с.
2. Адушкин В. В., Турунтаева С. Б. Техногенные процессы в земной коре. (Опасности и катастрофы). — М.: ИНЭК, 2005. 250 с.
3. Савич А. И., Газиев Э. Г. Влияние водохранилищ на поведение скальных массивов оснований высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2005. № 11. С. 33 – 37.
4. Природные опасности России. Т. 2. Сейсмические опасности / Ред. Соболев Г. А. М., 2000. 295 с.
5. Марчук А. Н., Марчук Н. А. Плотины и геодинамика. — М.: ИФЗ РАН, 2006. 155 с.
6. Тетельмин В. В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС. Состояние. Процессы. Прогноз. М., 2010. 234 с.
7. Westergaard H. M., Adkin A. W. Deformation of Earth's Surface due to Weight of Boulder Reservoir. U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo, Tech. Mem № 422, 1934.
8. Gough D. I. Incremental stress under a two-dimensional artificial lake. Can. J. Earth Sci., 6, 1067 – 1075, 1969.
9. Gough D. I., Gough W. I. Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba 1. Geophys. J 21, 65 – 78, 1970.
10. Абашидзе В. Г., Алексидзе М. А., Кирия Д. К., Савич А. И., Цагурия Т. А. Исследование перемещения и напряжения в приповерхностной части земной коры в районе водохранилища Ингурской ГЭС // Сообщения Академии наук Грузинской ССР. 133. № 2. 1989.
11. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР / Ред. И. А. Нерсесов. — М.: Наука, 1987. 238 с.
12. Егоркин А. В., Зюганов С. К., Михальцев А. В., Чернышев Н. М. Комплексные сейсмические исследования на геотраверсах // Глубинные исследования недр в СССР. Л., 1989. С. 226 – 230.
13. Егоркин А. В., Зюганов С. К., Павленкова Н. А., Чернышев Н. М. Результаты исследования структуры литосферы на профилях в Сибири // Глубинные исследования недр в СССР. Л., 1989. 271 с.
14. Тойб Р. Е., Мишук О. В. и др. Региональные геофизические исследования строения земной коры Алтае-Саянской геосинклинальной области // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Красноярск, 2003. Вып. 5. 334 с.
15. Z SOIL 2012. User manual. Zace Services Ltd Report 1985 – 2003. Lausanne: Elmpress International. Switzerland.
16. Савич А. И., Бронштейн В. И., Ильин М. М. Влияние водохранилищ на состояние и свойства скальных оснований больших плотин // Геодинамические исследования больших плотин. Тбилиси, 2002. С. 52 – 59.
17. Савич А. И., Замахаев А. М., Ильин М. М., Речицкий В. И., Комаров Ю. С. Результаты комплексных исследований напряженно-деформированного состояния и деформационных свойств левобережного примыкания Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии. Красноярск, 2003. Вып. 6. С. 127 – 139.
18. Землетрясения в Северной Евразии // Сб. за 1999 – 2006 гг. Обнинск.
19. Землетрясения в России // Сб. за 2005 – 2010 гг. Обнинск.
20. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Красноярск: Дом “Суринов”, 1999. 560 с.

Поздравление Игорю Владимировичу Семенову



2 августа 2013 года исполняется 75 лет известному ученому, инженеру, крупному организатору отечественной школы гидротехнического и гидроэнергетического строительства Семенову Игорю Владимировичу.

Начиная с 1960 года, после блестящего окончания Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева по специальности “Гидротехническое строительство”, он работает в институте “Гидропроект им. С. Я. Жука”, где последовательно прошел путь от инженера проектировщика до заместителя генерального директора — научного руководителя Научно-исследовательского сектора Гидропроекта, а затем Научно-исследовательского института энергетических сооружений.

Проработав 11 лет в проектных подразделениях Гидропроекта, Игорь Владимирович переходит в Научно-исследовательский сектор Гидропроекта, где по-настоящему раскрывается его талант ученого — исследователя гидротехнических сооружений, проектируемых и строящихся в сложнейших инженерно-геологических условиях. Под его руководством проводятся масштабные гидродинамические исследования крупнейших в стране гидротехнических сооружений, строящихся в сложнейших природных условиях, таких как Братская и Усть-Илимская гидроэлектростанции на Ангаре, Красноярская и Саяно-Шушенская на Енисее, Усть-Хантайская на Хантайке.

Игорем Владимировичем Семеновым были разработаны и реализованы при проектировании и строительстве численные, экспериментальные и

натурные методы оценки сейсмостойкости высоких бетонных плотин и крупномасштабных подземных сооружений Токтогульской и Курпсайской ГЭС на р. Нарын, Нурекской и Рогунской гидроэлектростанций на р. Вахш. За цикл этих работ Игорю Владимировичу присуждается звание лауреата премии Совета Министров СССР. Одновременно с этим Игорь Владимирович Семенов организывает и непосредственно участвует в научном обосновании проектных решений многих зарубежных объектов, таких как Евфратский гидроузел и ГЭС Тишрин в Сирии, ГЭС Хоабинь и ГЭС Шонла во Вьетнаме, ГЭС Тери в Индии и многих других.

Большой вклад И. В. Семенов внес в развитие атомной энергетики в нашей стране. Им проведены большие работы по обоснованию надежности и безопасности сооружений АЭС.

И. В. Семенов, являясь членом Российского Национального комитета Международной комиссии по большим плотинам, ведет большую работу по анализу, обобщению и распространению международного опыта гидротехнического строительства.

И. В. Семенов является членом-корреспондентом Российской академии естественных наук, вице-президентом Ассоциации “Гидропроект”, в которых ведет большую и важную работу. Им опубликовано более 100 научно-технических работ в области гидротехнического строительства. Игорь Владимирович член редколлегии журнала “Гидротехническое строительство”.

Особенно стоит отметить его изумительные человеческие качества: выдающийся ученый, талантливый инженер и вместе с тем исключительно скромный, доброжелательный человек.

Правительство, Минэнерго РФ, РАО “ЕЭС России”, ОАО “РусГидро” высоко оценили научный и практический вклад Игоря Владимировича в развитие отечественного гидротехнического и гидроэнергетического строительства, удостоив его правительственными и ведомственными наградами. Ему присвоена ученая степень кандидата технических наук.

Дорогой Игорь Владимирович! Коллеги и товарищи по работе, научная и инженерная общественность, редколлегия и редакция журнала “Гидротехническое строительство” искренне и сердечно поздравляют Вас с замечательным юбилеем и желают крепкого здоровья, успехов в дальнейшей научно-производственной и инженерной деятельности на благо нашей Родины.

Поздравление Виктору Михайловичу Лятхеру

10 июля 2013 г. исполнилось 80 лет крупному ученому в области гидроэнергетики и гидротехники, доктору технических наук, лауреату Государственной премии СССР, профессору Лятхеру Виктору Михайловичу.

Виктор Михайлович в 1955 г. с отличием закончил Московский энергетический институт по специальности инженер гидротехник-гидроэнергетик, а в 1961 г. – заочно механико-математический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Обучаясь в институте, Виктор Михайлович уже работал под руководством заведующего кафедрой гидравлики, профессора С. В. Избаша. При окончании института защитил дипломную научно-исследовательскую работу по развитию методов анализа параметров и решению уравнений турбулентного потока.

С 1955 по 2005 г. трудовая деятельность В. М. Лятхера была связана с НИИЭС (ранее – НИС Гидропроекта), где он начинал работать в отделе гидравлических исследований, а затем возглавил отдел динамических исследований гидротехнических сооружений.

Под руководством и при непосредственном участии В. М. Лятхера были проведены многочисленные гидродинамические исследования строящихся и эксплуатируемых гидроэлектростанций СССР, в том числе систематические лабораторные и натурные исследования гидродинамических нагрузок и вибраций элементов гидросооружений, численное моделирование, прогноз течений и гидродинамических нагрузок в стационарных и нестационарных условиях, а также натурные, лабораторные и расчетные исследования динамики водонасыщенных грунтов. Большое теоретическое и практическое значение имели работы, связанные с привлечением волновых методов к расчету сейсмостойкости гидротехнических сооружений. Результаты исследований сейсмостойкости гидросооружений, вероятностные методы прогноза сейсмических воздействий землетрясений, методы оценки и схемы повышения сейсмостойкости гидротехнических сооружений, гидроузлов, расположенных в сейсмоактивных



районах, таких как Токтогульский, Ну-рекский, Чиркейский, Курпсайский и др. и обеспечили высокий уровень надежности работы основных сооружений. Комплексные динамические исследования прочности и устойчивости плотины ДнепроГЭС и подземного машзала ГАЭС “Маркерсбах” (Германия) позволили обеспечить безопасность сооружений при значительно увеличенной интенсивности проведения взрывных работ.

Много сил отдал Виктор Михайлович решению проблем использования возобновляемых источников энергии – энергии ветра и морских течений. Научные достижения в этой области позволили создать новые типы ветроэнергетических установок и разработать технические предложения по использованию энергии морских течений и русловых потоков.

Виктор Михайлович имеет около 100 авторских свидетельств, отечественных и зарубежных патентов. Им опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях свыше 100 статей и ряд монографий, в числе которых “Турбулентность в гидросооружениях”, “Возобновляемая энергетика” и в соавторстве – “Динамика сплошных сред в расчетах гидросооружений”, “Гидравлическое моделирование”.

Виктор Михайлович обладает незаурядными способностями, организованностью, большим трудолюбием, целеустремленностью и настойчивостью в решении поставленных задач наиболее сложных и актуальных проблем энергетики. Он полон творческих замыслов и в настоящее время заканчивает работу над книгами: “Сейсмические воздействия”, “Гидродинамика сооружений”, “Использование энергии потоков”.

Редколлегия журнала “Гидротехническое строительство”, научная общественность, друзья и коллеги поздравляют Виктора Михайловича Лятхера с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья, благополучия, успехов в работе, в том числе в решении проблем возобновляемой энергетики и разработке новых технологий преобразования энергии и конструкций основного энергетического оборудования.

Новости гидроэнергетики и гидротехники

Строительство Богучанской ГЭС

1 июня 2013 г. на Богучанской ГЭС был поставлен на холостой ход ГА № 5. Соответствующее разрешение Ростехнадзора руководство станции получило накануне. Программа испытаний каждой машины состоит из нескольких этапов. Перед опробованием на холостом ходу была заполнена водой проточная часть агрегата, и выровнено давление в водоводе и спиральной камере, затем была произведена сушка гидроагрегата. После окончания сушки на остановленном гидроагрегате прошли высоковольтные испытания. Они включают в себя измерение сопротивления изоляции обмоток, измерение токов утечки в обмотках и испытание обмоток повышенным напряжением промышленной частоты. Все работы проводятся силами эксплуатационных служб ОАО “Богучанская ГЭС”. В испытаниях принимают участие шеф-инженер ОАО “Силовые машины” (изготовитель гидроагрегатов) и работники ЗАО “Енисей СГЭМ”, монтировавшие оборудование в 2012 – 2013 гг. Одновременно с завершением работ на ГА № 5 были начаты работы по “Программе индивидуальных испытаний под напряжением оборудования воздушной линии 500 кВ Богучанская ГЭС-Ангара № 1, открытый пункт перехода – 500 кВ”. Впервые ток напряжением 500 кВ был передан 14 июня. Программа испытаний агрегата № 5 завершилась включением агрегата в сеть на 72 часа 15 – 17 июня. По результатам испытаний будут подписаны акты готовности агрегата к работе, после чего ожидается получение разрешения Ростехнадзора на ввод агрегата в промышленную эксплуатацию. С этого момента номинальная мощность станции достигнет 1665 МВт. Ведется подготовка к испытаниям ГА № 6.

На ГА № 7 ведутся завершающие работы по монтажу трубопроводов, трансформаторов и токопроводов. ГА № 8 подготовлен к монтажу вала-надставки и генераторного подшипника. На ГА № 9 смонтирован вал турбины. Всего в течение месяца смонтировано около 500 т гидросилового и гидромеханического оборудования.

Строительные работы на гребне плотины ведутся в небольшом объеме. Завершается укладка бетона в секцию № 30, она последней будет возведена до проектной отметки 214,0 м. В июне уложено 3942 м³ бетона. До окончания работ на объекте осталось уложить 1981 м³ бетона. С гребня плотины и

из проезда между плотиной и машинным залом в июне демонтировано несколько строительных кранов.

Во второй декаде июня гидрологическая обстановка в районе строительства Богучанской ГЭС стабилизировалась, боковая приточность сократилась до показателей, обычных для межлетнего периода. Весеннее половодье 2013 г. началось в последних числах апреля. Его пик был пройден 6 мая, когда среднесуточная боковая приточность превысила 4300 м³/с, а общий приток к створу БоГЭС составил 7000 м³/с. За время половодья объем Богучанского водохранилища вырос с 18,627 до 22,368 км³. Подъем уровня воды в водохранилище был начат с 1 мая. Енисейское бассейновое водное управление с 1 июня 2013 г. установило для Богучанского гидроузла режим работы с расходом в нижний бьеф 2800...3350 м³/с, при условии поддержания УВБ на отм. 188,0 ± 0,20 м БС. По состоянию на 21 июня 2013 г. уровень верхнего бьефа Богучанской ГЭС составил 188,08 м.

Строительство Усть-Среднеканской ГЭС

На Усть-Среднеканской ГЭС ведется подготовка к пуску первого гидроагрегата. По состоянию на 01.06.2013 готовность всего гидроузла составляет 46,65%, а пускового комплекса в объеме двух гидроагрегатов – 98,87%. Завершены работы по укладке монолитного гидротехнического бетона в основные сооружения в объеме пускового комплекса, что составляет 885,57 тыс. м³. Смонтированы необходимые металлоконструкции, гидромеханическое и подъемно-транспортное оборудование.

В здании ГЭС выполнены работы по устройству керамзитобетонных перегородок, монолитных полов и отделочные работы. Смонтированы системы: АППЗ, вентиляции, освещения, водоотведения и водопровода, а также произведена наладка компрессорного оборудования, пневмохозяйства, насосной осушения проточной части агрегатов, оборудования КРУ 10кВ, оборудования ГРУ 15,75 кВ, силовых трансформаторов и трансформаторов СН. Выполнен монтаж двух гидротурбин РО115/0910-В-580 мощностью 145,4 МВт со сменным рабочим колесом и двух гидрогенераторов СВ 1260/153-60 УХЛ4 мощностью 142,5 МВт.

Все строительные-монтажные работы по объектам: земляная, глухая, станционная, водосбросная

плотины, низовая и верховая стенки, дренажный и подходной туннели, раздельная стенка выполнены в объеме пускового комплекса. Выполняются работы по возведению здания дренажной насосной на сопрягающем устое и помещений установки трансформаторной подстанции дренажной насосной. На пристанционной площадке выполнены работы по укладке бетона в блоки крепления откоса в объеме пускового комплекса ГА № № 1, 2. Производятся работы по устройству площадки установки аварийной дизельной электростанции контейнерного типа.

Выполнены строительно-монтажные и отделочные работы в блоке № 1 здания ПТК, КРУЭ-220 кВ и ЗЭС, работы по монтажу, испытаниям и наладке оборудования КРУЭ-220 кВ. В блоке № 2 здания ПТК, КРУЭ 220кВ и ЗЭС производятся отделочные работы. Закончен монтаж выходного портала и выходных опор КРУЭ-220 кВ, монтаж и заводка в здание КРУЭ провода и грозотроса со встроенным опτικο-волоконным кабелем связи. По ВЛ 220 кВ “Усть-Среднеканская ГЭС – ПС “Оротукан” выполнены строительно-монтажные работы в объеме 100%, произведены испытания под нагрузкой. ЛЭП введена в эксплуатацию в мае 2013 г.

С 20 мая начато наполнение Усть-Среднеканского водохранилища до пусковой отметки 256,0 м.

Строительство Загорской ГАЭС-2

На Загорской ГАЭС-2 успешно завершены 72-х часовые испытания КРУЭ-500 кВ. После освидетельствования комиссией Ростехнадзора КРУЭ-500 кВ встанет под напряжение. С его помощью в ближайшее время станет возможным проведение в штатном (проектном) режиме пусконаладочных работ на ГА №№ 1 и 2 с включением оборудования в электрическую сеть. В 2014 г. ОРУ-500 кВ действующей Загорской ГАЭС-1 будет демонтировано, и КРУЭ станет единым для двух станций.

Строительство Гоцатлинской ГЭС

На Гоцатлинской ГЭС завершены работы по обделке подходной штольни № 3 к туннелю эксплуатационного водосброса. В ходе работ было уложено 859 м³ бетона. Обделка штольни № 3 была начата 1 января 2012 г. силами ООО “Дагспецстройсервис”. После завершения работ объект был представлен к приемке рабочей подкомиссии. В ближайшее время должен начаться монтаж одностворчатых герметичных ворот весом более 5 т. Герметичные ворота высотой 3,0 м и шириной 4,7 м выполнены из металлоконструкций. Они имеют защитное покрытие и рассчитаны на сейсмичность 9 баллов по шкале МСК-64.

Эксплуатационный водосброс туннельного типа располагается на правом берегу и состоит из открытого нерегулируемого водоприемника в виде траншейного водослива, слабонаклонного туннеля и концевого устройства. Максимальный расход через эксплуатационный водосброс составляет 683 м³/с при отметке водохранилища 667,0 м.

В настоящее время на Гоцатлинской ГЭС идут бетонные работы на здании ГЭС, траншейном водосливе эксплуатационного водосброса и водоприемнике станции. Развернуты работы по сооружению селеотводного лотка в логу Ахулитляр.

Восстановление Саяно-Шушенской ГЭС

На ГА № 6 Саяно-Шушенской ГЭС начаты пусконаладочные испытания на холостом ходу. Этот гидроагрегат, наименее пострадавший во время аварии на СШГЭС, был введен в эксплуатацию после восстановительного ремонта в феврале 2010 г. В соответствии с программой восстановления и комплексной реконструкции он был выведен из эксплуатации в конце 2011 г. За прошедшее время проведена полная замена оборудования гидроагрегата: турбины, генератора и вспомогательных систем. На данный момент проверено вибрационное состояние гидротурбины, а также проведена балансировка ротора генератора. Ведется подготовка обмотки генератора к высоковольтным испытаниям. Завершающим этапом пусконаладочных работ станет комплексное опробование агрегата под нагрузкой в течение 72-х часов. По результатам комплекса испытаний будет принято решение о вводе ГА № 6 в эксплуатацию.

Продолжаются активные работы и на других заменяемых гидроагрегатах. В кратере ГА № 5 продолжается монтаж системы водяного охлаждения генератора, сборка его ротора и статора. В кратере ГА № 4 завершаются работы по демонтажу узлов старого гидроагрегата.

В конце мая 2013 г. после успешной работы под нагрузкой в течение 72-х часов приемочная комиссия подписала акт, разрешающий ввод первой очереди нового распределительного устройства Саяно-Шушенской ГЭС в промышленную эксплуатацию. Решение о реконструкции ОРУ 500 Саяно-Шушенской ГЭС было принято руководством ОАО “РусГидро” в 2010 г. Оборудование ОРУ за более чем 30 лет эксплуатации морально устарело и физически изнашивалось. При рассмотрении вариантов реконструкции было решено произвести полную замену устройства на новое элегазовое комплектное распределительное устройство (КРУЭ 500 кВ). Оно выгодно отличается компактностью и размещением оборудования в закрытом помещении, защищенным от воздействия дождя и снега.

Работы по сооружению КРУЭ были начаты в 2012 г. В нем смонтировано современное оборудование, отвечающее самым высоким требованиям эксплуатации и надежности, а также имеющее большой срок службы (до 50 лет). Оно включает в себя 19 ячеек производства швейцарской фирмы АВВ. Каждая такая ячейка объединяет выключатели, разъединители, заземлители и другое оборудование. В ячейках используется элегаз (SF₆), отличающийся уникальными изоляционными характеристиками при полной взрыво- и пожаробезопасности.

На данный момент через КРУЭ осуществляется выдача мощности гидроагрегатов № 9 и 10 по одной линии электропередачи 500 кВ. В дальнейшем по согласованию с Системным оператором будет произведен постепенный перевод остальных гидроагрегатов и линий электропередачи с действующего открытого распределительного устройства на новое элегазовое. Этот процесс должен завершиться в 2014 г., после чего старое оборудование будет демонтировано.

Строительство Верхне-Нарынского каскада ГЭС

12.06.2013 Председатель Правления ОАО “РусГидро” Дод Е. В. и Президент Кыргызской Республики Атамбаев приняли участие в церемонии начала строительства Верхне-Нарынского каскада ГЭС в Киргизии. Проект реализуется “РусГидро” в соответствии с соглашением, подписанным 20.09.2012 между правительствами России и Киргизии. Верхне-Нарынский каскад будет состоять из 4-х гидроэлектростанций: Акбулунской ГЭС и Нарыньских ГЭС-1, ГЭС-2 и ГЭС-3, общей установленной мощностью 237,7 МВт и выработкой 942,4 млн. кВт · ч. Каскад не будет оказывать влияния на водный режим реки и не затронет интересы Узбекистана и Казахстана, находящихся ниже по течению. Площади затопляемых земель минимальны, переселения населения не потребуется.

В настоящее время подготовлено ТЭО, определен генеральный подрядчик строительства. Верхне-Нарынский каскад ГЭС планируется построить в течение 5...6 лет. Первые гидроагрегаты на головной Нарынской ГЭС-1 должны быть введены в эксплуатацию уже в 2016 г.

Материалы подготовлены пресс-службой ОАО “РусГидро”: И. Слива, В. Скращук, Ю. Попов, А. Бутусова, И. Дворянов, Л. Лукманова

Сдано в набор 25.05.2013. Подписано в печать 22.07.2013. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 7,0. 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

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

г. Москва, Российская академия наук, 22-23 октября 2013 г.

По инициативе Российской академии наук (РАН) и Некоммерческого Партнерства "Научно-технический совет Единой энергетической системы» в период с 22 по 23 октября 2013 г. в г. Москве состоится Первый Международный научно-технический форум **«ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ» (REENFOR-2013)**.

Организаторами Форума являются Научный совет РАН по комплексным проблемам энергетики, Научный совет РАН по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, Научный Совет РАН по проблемам надежности и безопасности больших систем энергетики и Некоммерческое партнерство «Агентство научных и деловых коммуникаций» (НП «АНДК»).

Ожидается, что Форум пройдет при поддержке Комитета Государственной Думы РФ по энергетике, Министерства образования и науки РФ, Министерства энергетики РФ, Министерства экономического развития РФ, Министерства регионального развития РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, Министерства природных ресурсов и экологии РФ, Министерства Российской Федерации по развитию Дальнего Востока, других министерств и ведомств, ответственных за эффективное развитие использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в различных секторах экономики и в регионах России, а также Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

В Форуме планируется участие представителей ведущих энергетических компаний России: ОАО «РусГидро», ОАО «Интер РАО ЕЭС», ОАО «Российские железные дороги», ОАО «Росатом», ОАО «Лукойл», ОАО НК «Роснефть», ОАО «Газпром», ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Российские сети», ОАО «РАО ЭС Востока» и других компаний различных отраслей топливно-энергетического комплекса из разных регионов России.

Ожидается, что партнерами Форума станут государственные фонды и институты развития: ОАО «РВК», Государственная корпорация «Внешэкономбанк», Фонд «Сколково», ОАО «РОСНАНО», Технологические платформы, реализующие проекты в области ВИЭ, и другие. Партнерами Форума выразили готовность стать Международная финансовая корпорация (IFC) и Некоммерческое Партнерство по организации международных исследований и проектов в области энергетики "Глобальная энергия".

Спецификой Форума является его концентрация на рассмотрении проблем повышения эффективности практического использования передовых технологий возобновляемой энергетики, улучшения их энергетических и экономических показателей в различных климатических и социально-экономических условиях, анализе лучших практик использования ВИЭ в России. Этим аспектам, на большей части известных форумов, как правило, необходимого внимания не уделялось.

В работе Форума ожидается участие представителей ведущих международных организаций, научных центров и зарубежных компаний, активно работающих в области возобновляемой энергетики. Международный характер Форума обусловлен целесообразностью ознакомления с зарубежным опытом разработок и практического освоения ВИЭ. Установление более тесного научно-технического и делового сотрудничества с фирмами, проявляющими интерес к участию в развитии ВИЭ в России, позволит также обсудить вопросы их участия в создании головных образцов энергоустановок на ВИЭ на территории Российской Федерации.

В рамках Форума будут организованы пленарные заседания, круглые столы и презентации компаний и региональных представителей по актуальным проблемам разработки и практического использования технологий преобразования энергии солнечного излучения, энергии ветра, энергии биомассы, энергии малых водных потоков, геотермальной энергии, природного и сбросного низкопотенциального тепла с помощью тепловых насосов, других возобновляемых источников энергии с получением электроэнергии, тепла и холода.

Планируется также проведение научно-организационных мероприятий и обсуждение стратегических программ исследований и разработок в области ВИЭ Технологических платформ «Перспективные технологии развития возобновляемой энергетики», «Малая распределенная энергетика», «Биоэнергетика», «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности». Рассматривается возможность организации молодежной секции Форума.

ГЛАВНЫЕ ТЕМЫ ФОРУМА:

- Роль и место возобновляемых источников энергии в развитии централизованной, региональной и автономной энергетики. ВИЭ в Энергетической стратегии России;
- Технико-экономические показатели перспективных технологий энергетического использования ВИЭ с учетом региональных и природно-климатических условий их использования и особенностей потребителей. Лучшие отечественные и зарубежные практики;
- Механизмы стимулирования развития ВИЭ. Роль федеральных и региональных органов управления, отечественных и международных финансовых институтов;
- Проблемы подготовки специалистов в области возобновляемой энергетики в России;
- Приоритетные проекты развития ВИЭ в рамках Технологических платформ «Перспективные технологии возобновляемой энергетики», «Малая распределенная энергетика», «Биоэнергетика», «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности» (обсуждение в рамках Круглых столов).

Предполагается, что работа Форума будет организована на регулярной основе с проведением ежегодных сессий, специализированных совещаний, семинаров и других мероприятий с целью обобщения и распространения информации и научно-технического содействия успешному развитию практического использования ВИЭ в России и за ее пределами.

ОЖИДАЕМОЕ КОЛИЧЕСТВО УЧАСТНИКОВ: около 300 человек.

Секретариат форума:

Тел./факс: +7 495 984 81 25; e-mail: conference@andk.ru; Web: www.andk.ru

Ответственный секретарь: Оксана Гороховская

Тел./факс: +7 495 984 81 25, +7 985 924 13 73; e-mail: o.gorokhovskaya@andk.ru

В секретариат Форума следует обращаться по всем вопросам участия в Форуме, спонсорства и партнерства, при заказе дополнительных услуг (гостиницы, трансферы, культурная программа).

Информация о ходе подготовки Форума и условиях участия на сайте: www.reenfor.org

Сопредседатели Программного комитета Форума

Академик-секретарь отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, директор Объединенного института высоких температур РАН, академик

В.Е. Фортв



Президент НП «НТС ЕЭС», Президент Международной энергетической академии, Президент Корпорации «ЕЭЭК», член-корреспондент РАН

А.Ф. Дьяков



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 _____