



# 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.

№ 11

ноябрь

2010

## Содержание

- Анискин Н. А.** Факультету гидротехнического и специального строительства МГСУ (МИСИ) — 80 лет: итоги и перспективы . . . . . 3
- Рассказов Л. Н.** Подготовка специалистов гидротехников в МИСИ – МГСУ . . . . . 8
- Зерцалов М. Г.** Кафедра подземного строительства и гидротехнических работ . . . . . 16
- Сайнов М. П., Карбивник Н. А.** Устойчивость откосов грунтовой плотины с учётом пространственных условий восприятия нагрузок . . . . . 20
- Тер-Мартirosян З. Г.** Вопросы механической суффозии в гидротехническом, промышленном и гражданском строительстве . . . . . 23
- Потапов А. Д.** Науки о Земле: современный этап развития . . . . . 28
- Муравьев О. А.** Влияние режима работы турбины и настроек системы автоматического регулирования на условия устойчивости и критическую площадь уравнильных резервуаров ГЭС . . . . . 32
- Левачев С. Н., Языков С. В., Есиновский В. А., Мельник Г. В.** Судходные каналы “Евразия” и “Волго-Дон 2” . . . . . 39
- Пупырев Е. И., Волшаник В. В., Платонова О. А., Суйкова Н. В., Голубкина Е. П.** Приоритетные направления исследований в области защиты городских водных объектов . . . . . 44
- Рассказов Л. Н., Бестужева А. С., Нгуен Фыонг Лам** Учет “бегущей волны” в пространственных задачах сейсмоустойчивости грунтовых плотин . . . . . 47
- Рассказов Л. Н., Бестужева А. С., Нгуен Фыонг Лам** Поровое давление в грунтовых плотинах при сейсмических воздействиях . . . . . 54
- Брянская Ю. В., Байков В. Н., Волынов М. А.** Методические основы обработки данных гидрологических измерений речных потоков на прямолинейных участках русел . . . . . 60
- Долгополова Е. Н.** Потери энергии и гидравлическое трение открытого и подледного речного потока . . . . . 65



Открытое акционерное общество  
«Федеральная гидрогенерирующая компания» (ОАО «РусГидро»)

Московский государственный  
строительный университет

**Факультету гидротехнического и специального строительства  
Московского государственного строительного университета**

**Уважаемые коллеги!**

*Сердечно поздравляю коллектив факультета с 80-летним юбилеем.*

*Созданный в сентябре 1930 г. по инициативе выдающихся гидротехников - академиков Александрова И.Г., Веденеева Б.Е., Винтера А,В, и других ученых - факультет подготовил более 7000 инженеров высокой квалификации не только для нашей страны, но и для стран ближнего и дальнего зарубежья. Многие выпускники факультета получили признание во всем мире.*

*Сегодня факультет ГСС – один из крупнейших факультетов России. Он выпускает не только инженеров-гидротехников, но и готовит специалистов для других сфер экономики. Диссертационные советы факультета являются одними из наиболее авторитетных в области гидротехнического строительства. Профессора и доценты факультета разрабатывают учебные программы и лабораторные работы, пособия для студентов. 27 докторов наук на одном факультете – не всякий крупнейший НИИ или ВУЗ имеет коллектив специалистов такого высокого уровня.*

*За многие годы деятельности факультета его ученые и специалисты приобрели бесценный опыт научных исследований и технических решений. Разработки, выполненные учеными факультета ГСС, внедрены практически на всех гидроузлах России и многих стран мира. К числу важнейших относятся исследования в области статике и динамики бетонных и грунтовых плотин, гидравлики водосбросных сооружений и зданий ГЭС, подземных гидротехнических сооружений, механики грунтов и скальных пород.*

*Желаю коллективу факультета дальнейших успехов и новых творческих достижений на благо развития гидроэнергетического комплекса России, где трудятся многие ваши выпускники. Хочу также поздравить весь коллектив Московского государственного строительного университета с юбилеем факультета гидротехнического и специального строительства, который достойно выполняет свою главную задачу – подготовку высокопрофессиональных специалистов.*

Председатель Правления

Е. В. Дод

## Факультету гидротехнического и специального строительства МГСУ (МИСИ) — 80 лет: итоги и перспективы

Анискин Н. А., директор Института энергетического, водохозяйственного и природоохранного строительства (ИЭВПС), декан факультета



Анискин Н. А.

В 2010 г. исполняется 80 лет со дня образования гидротехнического факультета МГСУ (МИСИ). Это является хорошим поводом вспомнить прошедшее, оценить настоящее и заглянуть в будущее.

Бурное развитие гидроэнергетики в конце двадцатых – начале тридцатых годов прошлого столетия, вызванное реализацией плана ГОЭЛРО, требовало высококвалифицированных специалистов. Для их подготовки в 1930 г. в Московском инженерно-строительном институте (МИСИ) был организован **Гидросиловой факультет**, начавший выпуск инженеров-гидротехников. Инициатива создания факультета принадлежала участникам работы над историческим планом ГОЭЛРО — академику И. Г. Александрову, профессорам Е. В. Близняку и В. Д. Журину.

Факультет начинался с создания профилирующей кафедры, возглавляемой профессором Н. И. Анисимовым. В 1931 г. на ее основе создана **кафедра гидротехнических сооружений**, которую со дня основания до 1973 г. возглавлял заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, д. т. н. М. М. Гришин. С 1973 по 1978 г. кафедрой руководил профессор, д. т. н. С. М. Слисский. С 1988 г. по настоящее время кафедру возглавляет заслуженный деятель науки РФ, академик Академии водохозяйственных наук, профессор, д. т. н. Л. Н. Рассказов. Сегодня кафедра готовит инженеров-строителей по специальности “Гидротехническое строительство” со специализацией “Речные гидротехнические сооружения”. Ее выпускники

могут вести научно-исследовательские, проектные и строительные работы на всех типах гидротехнических сооружений, включая промышленные и специальные. Основные приоритетные направления научных работ кафедры достаточно широки — это исследования напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин на воздействия статических и динамических нагрузок, исследования фильтрационных и температурных режимов сооружений и оснований, исследования напряженно-деформированного состояния бетонных плотин, исследования по безопасности и технической диагностике гидротехнических сооружений. Сотрудники кафедры принимают активное участие в проектировании и строительстве гидроузлов, оказывают консультационные услуги многим зарубежным строительным фирмам, например в Египте (Асуан), Индии (ГЭС Тери), Перу (ГЭС Ольмос), Иране, Анголе (ГЭС Капанда), Таджикистане (Сангтудинская ГЭС).

В 1931 г. создана кафедра использования водной энергии. Первыми заведующими этой кафедрой были профессор В. М. Малышев и академик Б. Е. Веденеев. С 1937 по 1976 г. кафедрой руководил заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии РСФСР, лауреат государственной премии СССР, профессор, д. т. н. Ф. Ф. Губин, с 1976 по 1998 г. — академик Российской инженерной академии, ректор Московского государственного строительного университета, профессор, д. т. н. В. Я. Карелин. Ему на смену пришел профессор Г. В. Орехов, возглавляющий кафедру и сегодня. Выпускники кафедры — высококвалифицированные инженеры в области проектирования и строительства как крупных, так и малых гидроэлектростанций, гидроаккумулирующих и насосных станций широкого профиля, включая системы переброски стока рек, системы водоснабжения ТЭС и АЭС, коммунального и городского хозяйства. Основные научные интересы кафедры — это гидромеханические переходные процессы, закрученные потоки, гидравлика проточных элементов ГЭС, ГАЭС и насосных станций, строительство нетрадиционных гидроэнергетических установок.

Во время Великой отечественной войны в 1941 г. гидротехнический факультет в составе МИСИ был эвакуирован в г. Новосибирск. После возвращения в Москву в 1943 г. создана кафедра водного хозяйства и морских портов, организаторы

ром и руководителем которой до 1966 г. был заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, д. т. н. Н. Н. Джунковский. Затем до 1982 г. кафедрой руководил Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, профессор, д. т. н. А. В. Михайлов. С 1982 по 1992 г. кафедрой заведовали профессор, доктора техн. наук Г. Н. Смирнов и В. А. Лобанов. С 1992 г. до настоящего времени кафедру возглавляет академик, профессор, д. т. н. Ю. П. Правдивец. Научные исследования кафедры связаны с улучшением судоходных путей на свободных и шлюзованных реках, с разработкой новых конструктивных решений портов, портовых сооружений и сооружений на шельфе, с исследованиями воздействия внешней среды на морские гидротехнические сооружения, с охраной водной среды от загрязнения. На кафедре действует научно-исследовательская лаборатория (г. Мытищи), выполняющая работы по заказам Газпрома, Минобороны, Минтранса, ЛУКОЙЛа.

В 1955 г. на факультете образована кафедра производства и организации гидротехнических работ. Первым заведующим этой кафедрой стал доцент П. В. Бородин. С 1959 по 1962 г. кафедрой заведовал профессор И. И. Кандалов. С 1963 по 1975 г. кафедру возглавлял заслуженный строитель РСФСР, профессор, д. т. н. В. С. Эристов, сыгравший большую роль в развитии и становлении кафедры. Значительный вклад в подготовку инженеров-гидротехников внесли руководившие кафедрой в разное время доцент А. К. Третьяков (1975 – 1981 гг.) и профессор А. И. Чураков (1981 – 1982 гг.). Им на смену пришел академик Академии водохозяйственных наук, профессор, д. т. н. В. М. Мостков, много сил отдавший кафедре с 1982 по 1994 г. В 1995 г. решением совета факультета кафедра переименована в кафедру подземного строительства и гидротехнических работ. Это решение было продиктовано сложившейся реальностью: кафедра более 25 лет активно занималась вопросами подземного строительства. Сегодня кафедрой руководит академик Академии водохозяйственных наук, профессор, д. т. н. М. Г. Зерцалов. Научная деятельность кафедры направлена на разработку концепции использования подземного пространства крупных мегаполисов на примере г. Москвы. Спектр объектов этого строительства включает в себя общественные, торговые и спортивные центры, подземные гаражи, автотранспортные туннели и т.д. Не забывает кафедра и гидротехническую направленность: силами ее сотрудников проведены численные исследования комплекса подземных сооружений Рогунского гидроузла.

Одной из первых кафедр, вошедших в состав факультета гидротехнического строительства, является образованная в 1929 г. кафедра гидравлики. Ее

создателем и руководителем с 1930 по 1944 г. был профессор, д. т. н. В. Н. Кузнецов. С 1945 по 1961 годы кафедрой возглавлял профессор В. Д. Журин, с 1961 по 1969 г. — профессор, д. т. н. А. П. Юфин, а с 1969 г. — профессор, д. т. н. Е. Д. Мальцев. С 1976 по 1998 г. кафедрой гидравлики руководил академик Академии водохозяйственных наук, Академии естественных наук и Академии экологии и природопользования профессор, д. т. н. А. В. Мишуев. С 1998 по 2008 г. кафедра работала под руководством члена-корреспондента Академии водохозяйственных наук, профессора, д. т. н. В. С. Боровкова. Сегодня кафедрой руководит профессор А. Л. Зуйков. Научные интересы кафедры лежат в области изучения русловых потоков и влияния на них урбанизации, исследований нестационарных и закрученных водных потоков и гидродинамических явлений.

Строительство любого сооружения, а тем более гидротехнического начинается с исследования и изучения инженерно-геологических условий места строительства. Факультет гидротехнического строительства не мыслим без кафедры инженерной геологии, созданной в 1937 г. по инициативе профессора, д. г.-м. н. И. В. Попова, который возглавлял ее до 1946 г. С 1946 по 1966 г. кафедрой руководил профессор, д. г.-м. н. Н. Я. Денисов, а с 1966 по 1983 г. — профессор, д. т. н. Л. Д. Белый, много сделавший для развития инженерно-геологических изысканий в гидротехническом строительстве. С 1983 г. по 1998 г. кафедру возглавлял профессор Г. А. Паушкин. В 1998 г. кафедра переименована в кафедру инженерной геологии и геоэкологии, возглавил ее профессор А. Д. Потапов. В последние годы кафедрой сделан существенный научный вклад в изучение теоретических проблем современной инженерной геологии и решение широкого спектра прикладных задач, связанных с проведением инженерно-геологических изысканий в стесненных условиях существующей городской застройки; с комплексным обследованием реконструируемых объектов и зданий, попадающих в зону влияния нового строительства; с обоснованием защиты памятников истории и культуры, защиты застроенных территорий от опасных геологических процессов.

Ровесницей факультета является кафедра механики грунтов, оснований и фундаментов, также образованная в 1930 г. До осени 1931 г. ее возглавлял профессор П. П. Смиренин, которого на этом посту сменил доцент Н. Н. Богословский. С 1933 г. до начала Великой Отечественной войны ее возглавлял профессор, д. т. н., позже генерал-майор инженерной службы В. К. Дмоховский. С 1941 по 1950 г. кафедрой руководил Н. Н. Богословский. В 1951 г. на эту должность был избран член-корреспондент АН СССР, профессор, д. т. н. Н. А. Цытович. Про-



В кабинете декана обсуждаются вопросы развития факультета.

Слева направо: профессор В. С. Боровков., декан Н. А. Анискин, зав. кафедрой производства и организации гидротехнических работ М. Г. Зерцалов, ст. преподаватель А. В. Косолапов, зав. кафедрой гидротехнических сооружений Л. Н. Рассказов

фессор Н. А. Цытович, возглавлявший кафедру до 1984 г., внес большой вклад в развитие механики грунтов и фундаментостроения. В 2010 г. в МГСУ проходят юбилейные мероприятия, посвященные 110-летию со дня рождения Н. А. Цытовича. С 1984 по 2000 г. кафедрой руководил академик Российской Академии наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, д. т. н. С. Б. Ухов. С 2000 г. по настоящее время кафедру возглавляет заслуженный деятель науки РФ, академик Академии водохозяйственных наук, профессор, д. т. н. З. Г. Тер-Мартirosян.

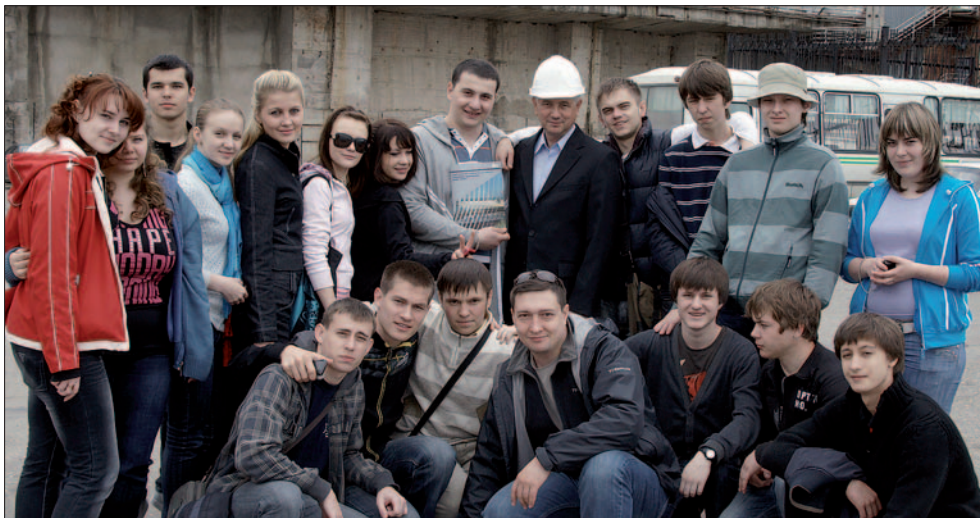
В настоящее время кафедра механики грунтов, оснований и фундаментов является крупным научным и педагогическим центром, в котором наряду с образовательной деятельностью по подготовке инженеров-строителей выполняются научные исследования по теоретическим и прикладным проблемам механики грунтов, оснований, фундаментов и прикладной геомеханике. Приоритетные направления научной деятельности сосредоточены на сопровождении проектов оснований и фундаментов высотных зданий и сооружений повышенной ответственности, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях; на обследовании зданий и их фундаментов, а также составлении рекомендаций по их реконструкции.

Самая молодая кафедра факультета — кафедра управления природной техногенной средой, созданная в 2002 г. Со дня основания кафедры ее возглавляет профессор, д. т. н. Е. И. Пупырев. Главная особенность кафедры состоит в том, что ее педагогической, производственной и материальной базой является институт “МосводоканалНИИпроект”. Это позволяет студентам не только в теории, но и на практике ознакомиться со сложными законами и инженерными приемами восстановления городской водной среды. Выпускники кафедры решают инже-

нерные задачи по защите поверхностных и подземных вод от загрязнения; по регулированию качества воды в водоемах; по обеспечению надежности инженерных сооружений, защищающих водную среду; по обезвреживанию и утилизации твердых, жидких и газообразных промышленных и бытовых отходов; по проведению экологического мониторинга городской окружающей среды.

Усилиями всех перечисленных выше кафедр, входящих в состав факультета гидротехнического и специального строительства (ГСС), обеспечивается успешное развитие факультета, его сегодняшнее достойное состояние и высокий уровень подготовки выпускаемых кадров. Неоценимый вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов-строителей и развитие строительной науки внесли такие работавшие на факультете корифеи, как профессора А. Д. Альтшуль, Н. Н. Аршеневский, А. Р. Березинский, Г. А. Воробьев, П. И. Гордиенко, М. Ф. Губин, Л. П. Иванов, Г. И. Кривченко, Л. И. Кудояров, А. А. Ничипорович, Г. М. Ломизе, М. В. Малышев, В. М. Мостков, В. П. Недрига, Г. А. Смирнов, С. Б. Ухов, А. И. Харин, Г. Л. Хесин, Ю. Е. Хечинов, С. А. Юфин и многие другие. К сожалению, перечислить всех и коротко рассказать об их вкладе не позволяет объем статьи, но пока существует факультет ГСС и его кафедры, мы помним и чтим эти имена.

В настоящее время на кафедрах факультета плодотворно трудятся профессора В. В. Берлин, В. В. Волшаник, И. В. Дудлер, В. В. Казеннов, И. Г. Кантаржи, А. Л. Крыжановский, С. Н. Левачев, В. В. Малаханов, И. Е. Михайлов, А. В. Мишуев, О. А. Муравьев, Б. Д. Носков, В. В. Семенов, А. К. Тарасов, С. Н. Чернышев, Ю. А. Шашлов. На кафедрах факультета преподают 62 профессора, из которых 27 имеют степень доктора наук, 63 преподавателя имеют степень кандидата, четверо обуча-



Учебная практика студентов факультета ГСС по каскаду Волжских ГЭС

ются в докторантуре. Ученые факультета создали несколько научных школ мирового значения. Все это говорит о высоком учебном и научном потенциале факультета и его кафедр.

Много добрых слов можно казать в адрес работников деканата, осуществляющих управление факультетом, — это заместители декана Е. В. Бажина, А. В. Манько, Д. Ю. Чунюк, Ю. А. Шашлов, методисты Н. И. Лозина, И. А. Романова, И. А. Трунихина, С. А. Трунихина. Они много лет работают на факультете и преданы его делу.

На факультете ГСС свято чтят традиции. Например, ежегодно проводится посвящение студентов в гидротехники. Яркой традицией является учебная ознакомительная практика для студентов первого курса. Уже 35 лет первокурсники вместе с преподавателями ведущих кафедр на комфортабельном теплоходе через канал им. Москвы прохо-

дят по каскаду волжских гидроэлектростанций: Угличской, Рыбинской, Горьковской, Чебоксарской, Жигулевской. Во время поездки учебный процесс не прекращается. Помимо лекций по гидроузлам и введению в специальность проводятся занятия по основным предметам учебного плана. Трудно переоценить значение этой практики в учебном и воспитательном процессе: у студентов появляются гордость за выбранную профессию, уверенность в завтрашнем дне, желание учиться. Такая практика — недешевое удовольствие. Каждый год факультет ГСС прилагает большие усилия для ее организации и проведения. Значительную помощь оказывают организации гидроэнергетического комплекса, члены попечительского совета и выпускники факультета. В последние годы существенная поддержка получена от ОАО «РусГидро», ГОУ ВПО МГСУ, завода «Гидросталь», выпускников факультета

А. Д. Кесова, А. М. Папикяна и многих других. Огромная им благодарность от студентов и преподавателей гидротехнического факультета.

В настоящее время факультет ГСС входит в состав Института энергетического, водохозяйственного и природоохранного строительства (ИЭВПС), который создан в МГСУ в октябре 2005 г. Целью создания института было объединение научно-педагогического потенциала факультетов университета, имеющих общие задачи и направленность в области учебной и научной деятельности. По этому принципу были объединены три факультета: водоснабжения и водоотведения, гидротехнического и специального строительства, теплоэнергетического строительства. Институт располагает кадрами высшей научной квалификации: преподавательской деятельностью и научной работой заняты 43 профессора, доктора технических наук, имена которых широко известны не только в нашей стране, но и за её пределами. Три из пяти специальностей института прошли международную аккредитацию в Институте инженеров-строителей в Великобритании. Располагая таким научно-педагогическим потенциалом, институт формирует и реализует научные программы и исследования, связанные с атомной энергетикой и гидроэнергетикой, активно участвует в программах комплексного использования водных ресурсов и охраны окружающей среды, создает кадровый резерв, привлекает к участию в научных исследованиях студентов, повышает качество подготовки магистров и аспирантов, модернизирует лабораторную базу.

Коллективу факультета ГСС в ближайшем будущем предстоит выполнить сложные задачи, обусловленные следующими реалиями и грядущими изменениями. Московский государственный строительный университет стал победителем конкурса по программам развития среди высших учебных заведений, и ему присвоена категория “национальный исследовательский университет”. На реализацию заявленной программы МГСУ будет дополнительно выделено бюджетное финансирование в объеме 1,8 млрд. руб. на период с 2010 по 2014 г. (общая продолжительность реализации программы развития — 10 лет) при софинансировании из собственных внебюджетных средств университета не менее 360 млн. руб. за тот же период. Значительная часть этих средств будет использована на развитие факультета ГСС для решения задач кадрового обес-

печения, реконструирования и модернизации учебной и научно-исследовательской лабораторной базы. Результатом этих преобразований должно стать создание, по-существу, нового современного учебно-научного подразделения университета, способного решать широкий круг задач для строительной отрасли в целом и гидротехники в частности.

Вторая особенность сегодняшней деятельности факультета — это подготовка к переходу на двухуровневую систему подготовки специалистов. По плану Министерства образования и науки РФ с 1 сентября 2011 г. начнется обучение по первой ступени — бакалавриату. Параллельно будет вестись обучение в рамках инженерной подготовки (для студентов поступивших в ВУЗ в 2007–2010 г.), специалитета по новой специальности “Строительство уникальных зданий и сооружений” и магистратуры. Переход на бакалавриат с сокращением срока обучения до 4 лет и работа одновременно по нескольким учебным планам потребует от профессорско-преподавательского состава максимальной концентрации, внедрения в учебный процесс современных форм обучения. Вместе с тем необходимо сохранить и даже повысить уровень подготовки выпускников.

Последние два десятилетия для отечественной гидротехники были очень сложными. Если до 1991 г. благодаря активному гидроэнергетическому строительству в СССР страна находилась на втором месте в мире по суммарной установленной мощности и выработке электроэнергии на ГЭС, то сейчас Россия занимает пятое место в мировом рейтинге. После 1991 г. в России в основном продолжали достраивать и вводить в эксплуатацию ранее начатые объекты. В соответствии с “Программой развития гидроэнергетики России на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г.” в стране намечено строительство 59 ГЭС общей мощностью от 39 тыс. до 44 тыс. МВт и 8 ГАЭС общей мощностью более 12 тыс. МВт. По-сути, этот план можно назвать планом ГОЭЛРО-2. Сегодня жизнь диктует необходимость такого развития гидроэнергетики. Коллектив факультета гидротехнического и специального строительства МГСУ полон оптимизма и готов внести свой вклад в выполнение этого плана, такой как подготовка высококвалифицированных кадров и научные исследования для проектируемых и строящихся объектов.

## Подготовка специалистов гидротехников в МИСИ – МГСУ

Рассказов Л. Н., заведующий кафедрой гидротехнических сооружений МГСУ, заслуженный деятель науки РФ, доктор техн. наук, профессор



Рассказов Л. Н.

главлял профессор Н. И. Анисимов. Он был автором книг по плотинам, турбинам, уравнильным резервуарам, основаниям и фундаментам гидросооружений. Эти издания не потеряли своего актуального значения и сегодня. В них раскрывается физическая и химическая сущность рассматриваемого явления, что часто отсутствует в современных книгах.

С 1931 г. кафедру гидротехнических сооружений возглавил профессор М. М. Гришин (рис. 1), за плечами которого уже были изыскания по трассе канала Волго-Дон. Эти изыскания были связаны с большими трудностями, так как шла гражданская война. 18 марта 1919 г. в своем письме 1 к А. С. Аксалитному, главному инженеру водной магистрали Волга — Дон — Азовское море, М. М. Гришин писал: “Как известно Вам, в августе 1918 мы ехали в Царицын на исследования. Прибыли туда под гром пушек, обосновались в Сарепте. Недели 2–3 жили в атмосфере близости фронта: канонада, мобилизация, военная власть, ни с чем не считающаяся, реквизиция помещений, ежедневно проходящие войска, формирование и обучение новых. О работе думать было трудно. Время и силы уходили исключительно на преодоление сопротивления. Каковы последние были, можете судить по тому, что бывшая с нами в Сарепте партия инженера Шумакова была арестована (просидели в Царицынском ЧК две недели и, конечно, были выпущены за неимением вины).

После долгих хлопот нас всех освободили от общей мобилизации, фронт отодвинулся от нас, и представилась возможность работать. К середине сентября в районе Сарепты работала съемочная партия, буровой отряд и производились некоторые гидрометрические работы. Отношения с властями будто бы наладились. В конце сентября я уехал в Москву с денежной отчетностью и целым рядом вопросов к нашему Управлению, именуемому Уводстроем. Дня через два

после отъезда моего (как будто только этого и ждали) все оставшиеся, несмотря на освобождение от мобилизации, были мобилизованы (даже женщины для уборки хлеба и др. работ). Всё имущество велено было передать в местный совет, а технический персонал зачислили в рабочую роту и заставили пилить дрова для военной хлебопекарни...

После долгих усилий и в Москве, и в Царицыне эта затея местного штаба была ликвидирована. За этим последовало новое наступление казаков на Царицын, эвакуация партии в Царицын, возвращение и некоторый спокойный период ноября — декабря, когда работы велись, но не очень интенсивно благодаря холодной погоде и ветрам. За это время в Москве я обивал пороги Уводстрою, добиваясь учреждения Управления работ. Я считал, что без этого наша работа была бы + 1 прибавление к истории Волго-Донского канала и бесцельно было бы её продолжать.

В ноябре началась организация Управления работ, с декабря наша исследовательская организация перешла в Управление работ, все как будто налаживалось. В январе последовало третье наступление казаков на Царицын, Сарепта была занята. В феврале события повернулись в другую сторону. Произошло наступление советских войск по всему Южному фронту, довольно успешное. От казаков очищены Воронежская губерния, почти вся Донская область, остался только клочок у Новочеркасска. Но от наших сарептян ни слуху ни духу. По-видимому, с отходом казаков принуждены уйти и они.

Управление работ формировалось довольно медленно, за отсутствием и инженеров, и техников и др. служащих. При обилии учреждений в Москве, с распущенным личным составом трудно быть “безработным”. Правда, работая даже “вовсю”, трудно быть сытым.

Управление работ в Москве занимается составлением проекта, для чего сил у нас все-таки маловато.



Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, действительный член Академии строительства и архитектуры СССР, доктор техн. наук, профессор М. М. Гришин



Библиотеки почти все за зиму заморожены, книжные магазины национализированы – литературы тоже мало. Составлены основные задания и отправлены в Н. Т. С. Пока в основу всех предположений кладется материал нашего технического бюро — все записки, составленные мною.

В ближайшем будущем — наша часть уезжает на места — на работы по той же приблизительно программе, которая была намечена летом прошлого года.

В прошлом году удалось выполнить работы только в Сарептском районе. Дополнения касаются, главным образом, опытных исследований. Дело опытов, как лабораторных, так и на месте, предполагается развить и поставить возможно шире. Боюсь Вас затруднять перечислением намеченных работ, которые я считаю чрезвычайно важными не только для нашего канала, но и вообще. Сюда относятся изучения испарения, фильтрации в грунт под сооружение. Запроектированы особые бассейны в разных грунтах, в которых будут вестись наблюдения над просачиванием, линии депрессии и т.д. Предполагается испытывать различные меры борьбы с фильтрацией.

В мае — июне все Управление собирается перебраться в Царицын. Жизнь здесь тяжела: нет продовольствия, топлива, безумная дороговизна, с которой не справляются никакие оклады. Преимущества Москвы — библиотеки, технический персонал — фактически не существует, как я уже говорил, нет смысла Управлению работ и оставаться.

Существование нашего дела подвергается многим и многим опасностям, неожиданным часто, каким-то интригам. Есть, какие — то благожелатели, стремящиеся погасить начатое, ликвидировать, но мы, слава Богу, не смущаемся и развиваемся”.

С 1927 г. М. М. Гришин возглавлял проектирование Волго-Донского судоходного канала. Именно он предложил регулирование р. Дон большим водохранилищем (Цимлянским).

Упоминание о проектировании и строительстве Волго-Донского канала относится к началу XVII века. Необходимость строительства канала хорошо описал боевой генерал А. Х. Бенкендорф (тогда он ещё был полковником). А. Х. Бенкендорф: “... мы ...направились посетить славный Дон — край неугомонных и воинственных донских казаков. В этом месте Волгу от Дона отделяют всего 70 – 80 верст. Сулейман II (двенадцатый Османский султан) и Петр I хотели соединить их каналом, и мы проехали по местам, где были видны следы работ, начатые этими великими людьми. Думаю, что государь, который осуществит этот грандиозный проект, сделает больше для процветания и обогащения России, чем те, кто прибавляет новые губернии и к без того бескрайней территории. Канал дал бы возможность вывозить в Черное море продукцию плодородных частей России и соединить Каспийское море с морями Европы”<sup>2</sup>.

300 лет спустя Волго-Донской канал был построен. В феврале 1941 г. на Политбюро был утвержден проект Волго-Дона. В послевоенный период рассмат-

ривались доработки проекта, но трасса канала и его основные параметры были утверждены в 1941 г. Представляли проект на Политбюро главный инженер проекта С. Я. Жук и его заместитель профессор К. А. Михайлов.

За 2,5 года, с 1949 по 1952 г., сооружения канала были построены. Специально для этой стройки Уралмаш создал шагающий экскаватор-драглайн.

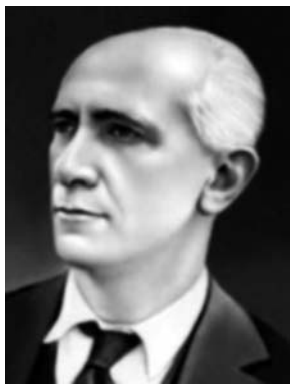
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, действительный член Академии строительства и архитектуры, доктор техн. наук, профессор М. М. Гришин возглавлял кафедру гидротехнических сооружений до 1973 г., а работал профессором на кафедре до 1979 г. Он создал свою школу в науке. В 1999 г. мировое сообщество признало лучшим строительным объектом XX в. Асуанский гидроузел на р. Нил (Египет), проект которого и строительство были осуществлены советскими инженерами, в этом большая заслуга и кафедры и лично М. М. Гришина.

Кафедра гидротехнических сооружений развивалась. В 1933 г. из нее выделилась кафедра использования водной энергии, в 1943 г. — кафедра водного хозяйства и морских портов, в 1955 г. — кафедра производства и организации гидротехнических работ. В предвоенное десятилетие под редакцией М. М. Гришина и Е. В. Близняка был создан капитальный труд — учебник “Гидротехнические сооружения” в двух томах. Создавалась лабораторная и научно-исследовательская база кафедры и факультета. Совершенствовалась методика преподавания. Все преподаватели были связаны с проектными и исследовательскими организациями. К примеру, М. М. Гришин был заместителем С. Я. Жука, главным инженером проекта Куйбышевского (теперь Жигулевского) гидроузла в створе “Красная Глинка”, председателем технического совета института “Гидропроект”, заведовал гидротехническим отделом ВНИИВОДГЕО. Аналогично работали и другие сотрудники. Это питало кафедру новыми идеями. Создавало творческую атмосферу.

В послевоенные годы коллектив кафедры гидротехнических сооружений стал пополняться новыми преподавателями. На кафедру пришли профессор А. Р. Березинский; инженеры П. П. Орлов и Н. А. Спирин; кандидаты техн. наук Н. П. Розанов и Н. Н. Веригин, которые после защиты докторской диссертации стали профессорами кафедры, профессор, доктор техн. наук А. А. Ничипорович. В аспирантуру пришли участники Великой Отечественной войны В. И. Щелканов, С. В. Лузан, А. С. Образовский, А. И. Антипов, Г. А. Паушкин и др. Защитив диссертации, они стали ведущими проектировщиками, учеными, преподавателями кафедр. Участники ВОВ В. П. Недрига и В. Н. Поспелов защитили кандидатские диссертации и стали доцентами кафедры. Защитили диссертации молодые аспиранты В. Г. Орехов и П. П. Мойс.

На кафедре создавались новые учебники, более современные, отражающие последние достижения науки.

<sup>2</sup> Бенкендорф А. Х., Дневники // Наше наследие. 2004. № 72.



Академик И. Г. Александров

Первый выпуск инженеров факультета состоялся в 1934 г. В работе государственной экзаменационной комиссии по защите дипломных проектов приняли участие академики И. Г. Александров, Б. Е. Веденеев, А. В. Винтер. Эти специалисты были инициаторами создания гидротехнического факультета в МИСИ. Они дали высокую оценку подготовке инженеров-гидротехников.

Темы дипломных проектов, как настоятельно рекомендовали И. Г. Александров, Б. Е. Веденеев и А. В. Винтер, давались студентам реальные, таковыми они являются и в настоящее время.

И. Г. Александров, Б. Е. Веденеев и А. В. Винтер на этапе становления учебного процесса преподавали на кафедре гидротехнических сооружений. Академик Иван Гаврилович Александров — главный инженер проекта ДнепроГЭС после завершения строительства этой электростанции возглавил Советский национальный комитет по большим плотинам и был представителем Советского Союза в различных международных организациях. Участвовал в качестве главы делегации на конгрессах по большим плотинам, симпозиумах.

В довоенный период кафедра вела преподавание по следующим дисциплинам: “Гидротехнические сооружения, основания и фундаменты” (учебник написал Н. И. Анисимов), “Инженерная геология”, “Водные пути”, “Гидрология” и др. Первыми аспирантами кафедры были И. В. Федоров и Ю. М. Шехтман, затем пришли И. А. Кузьмин, В. П. Недрига и Н. П. Розанов.



Профессор, доктор техн. наук С. М. Слисский



Заседание ГЭК. Первый выпуск гидросиловиков.

Слева направо: проф. В. В. Чихачев, В. М. Малышев, академик Б. Е. Веденеев, проф. М. М. Гришин, академик А. В. Винтер

В 1959 г. параллельный факультет гидротехнического строительства Московского энергетического института (МЭИ) был переведен в МИСИ. На кафедру гидротехнических сооружений пришел работать участник ВОВ, доцент, кандидат техн. наук С. М. Слисский. В 1963 г. он защитил докторскую диссертацию и стал одним из ведущих профессоров факультета. С. М. Слисский вел активную педагогическую и научную работу. Долгое время был деканом гидротехнического факультета, а с 1973 г. по рекомендации М. М. Гришина стал заведующим кафедрой гидротехнических сооружений. С. М. Слисский выделялся своей необыкновенной энергией и большой эрудицией, а также принципиальностью и доброжелательностью.

Обширные научные исследования кафедра смогла развернуть после создания научных лабораторий. Вначале была лаборатория гидравлических исследований гидротехнических сооружений. А. Р. Березинский проводил исследования по определению коэффициентов расхода различных водосливов, главным образом с широким порогом. В начале 1950-х гг. П. И. Гордиенко начал исследования водосливных грунтовых плотин (рис. 1), водосливы на которых выполняются из сборного железобетона в виде клиновидных плит, образующих подобие рыбьей чешуи. С гидравлической точки зрения это быстроток повышенной шероховатости, в настоящее время его начинают использовать на водосливной поверхности плотин.

В Великобритании на основе научных исследований П. И. Гордиенко и Ю. П. Правдивца были проведены собственные исследования, которые подтверди-



Профессор, доктор техн. наук П. И. Гордиенко

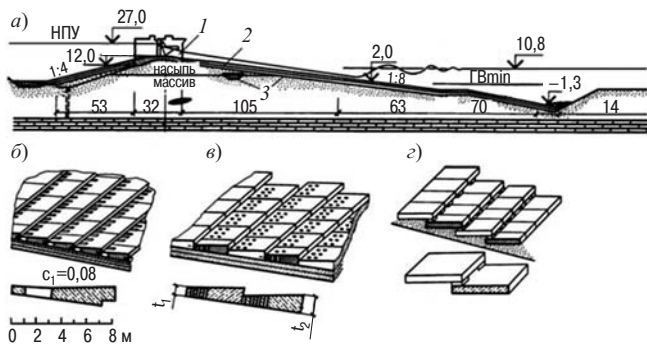


Рис. 1. Водосливная грунтовая плотина:

*a* — продольное сечение; *1* — оголовок; *2* — лоток; *3* — дренаж; *б* — плиты клиновидные с консолью без связи; *в* — то же, без консоли с гибкими связями; *г* — плоские плиты прямоугольного сечения, уложенные с нахлестом

ли жизнеспособность водосливных грунтовых плотин, и разработаны технические условия на их проектирование. В настоящее время на западе в связи с принятием новых норм по определению максимальных расчетных расходов на многих гидроузлах проводится расширение пропускной способности. Только в США подлежат реконструкции 50 тыс. гидроузлов. Внедрение водосливных грунтовых плотин позволит (по мнению британских инженеров) существенно сократить расходы на реконструкцию. Французские инженеры для этих целей предлагают и внедряют водосливы типа “гидроплюс”.

С. М. Слиский написал очень важную и уникальную монографию “Гидравлика зданий гидроэлектростанций”. Он разработал методику увеличения напора на турбину за счет эффекта эжекции, что привело к созданию нового типа гидроэлектростанции (на равнинных реках) — совмещенной, при которой в здании между турбинами располагаются напорные водосбросы. Конечно, сравнительно небольшой экономический эффект от эжекции достигается в период сброса паводковых вод.

На стадии подготовки докторской диссертации Н. П. Розанов провел большие гидравлические исследования вакуумных оголовков водосливов.

За аспирантскую работу о динамическом взаимодействии групп вертикальных цилиндрических оболочек с жидкостью (к примеру, опоры моста) аспиранту В. А. Джупанову (Болгария) была присвоена степень доктора технических наук (руководитель — П. И. Гордиенко).

Огромное значение для кафедры гидротехнических сооружений имело создание в начале 1960-х гг. научной лаборатории по модельному исследованию бетонных плотин (рис. 2). Научным руководителем лаборатории стал профессор М. М. Гришин. Исследования проводила большая группа сотрудников кафедры, в том числе Н. П. Розанов, В. Г. Орехов, Г. М. Каганов. Исследования относились не только к отечественным гидроузлам, но и к строящимся за рубежом (Болгария, Куба и т.д.).

Огромное значение для развития факультета имели исследования Кампыр-Раватской (теперь Андижан-

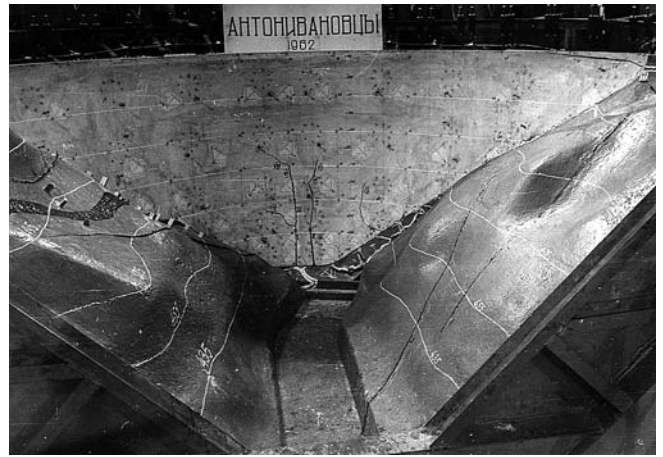


Рис. 2. Стеновые испытания арочных плотин

ской) контрфорсной плотины (рис. 3), которые проводились кафедрами факультета совместно, так как исследования касались всех аспектов их деятельности — это инженерная геология и исследования сопротивления сдвигу бетона по скале, конструкция плотины и методы возведения, пропуск строительных расходов, температурные напряжения и сброс паводковых расходов, сейсмостойкость плотины и фильтрация в основании и в обход плотины (рис. 3). В основании плотины имели место тектонические нарушения и зоны с различными модулями упругости. На основании модельных исследований решались вопросы сейсмостойкости, напряженно-деформированного состояния основания. Это была первая в СССР строящаяся массивная контрфорсная плотина. В результате исследований была выявлена необходимость изменения в предполагаемой конструкции плотины — создание в основании бетонной контрфорсной плотины плиты

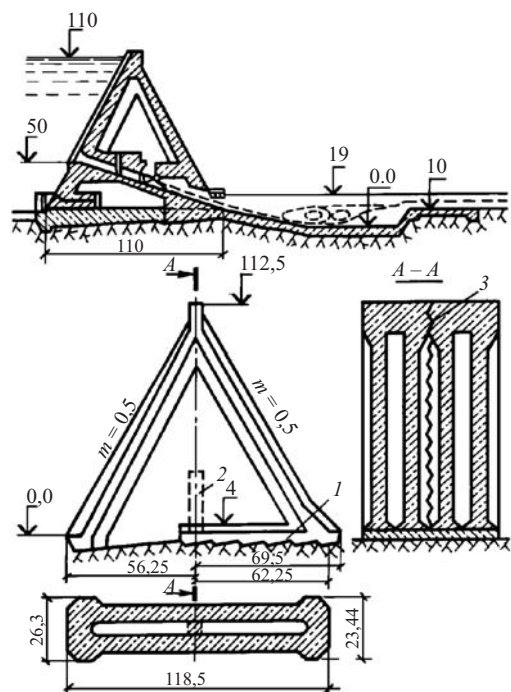
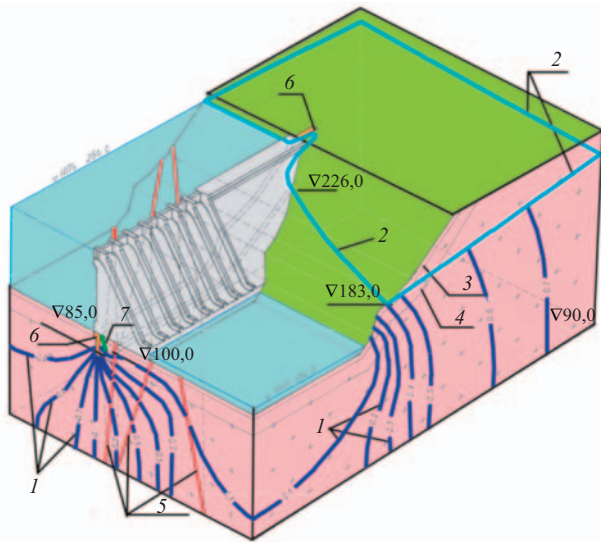


Рис. 3. Кампыр-Раватская (Андижанская) плотина



**Рис. 4.** Пространственная фильтрация в левобережной части створа Бурейской плотины:

1 — “следы” эквипотенциалей; 2 — “следы” депрессионной поверхности; 3 — нижняя граница 1-го слоя основания ( $K_f = 20$  м/сут); 4 — нижняя граница 2-го слоя основания ( $K_f = 2$  м/сут); 5 — тектонические зоны; 6 — цементационная завеса; 7 — дренаж основания

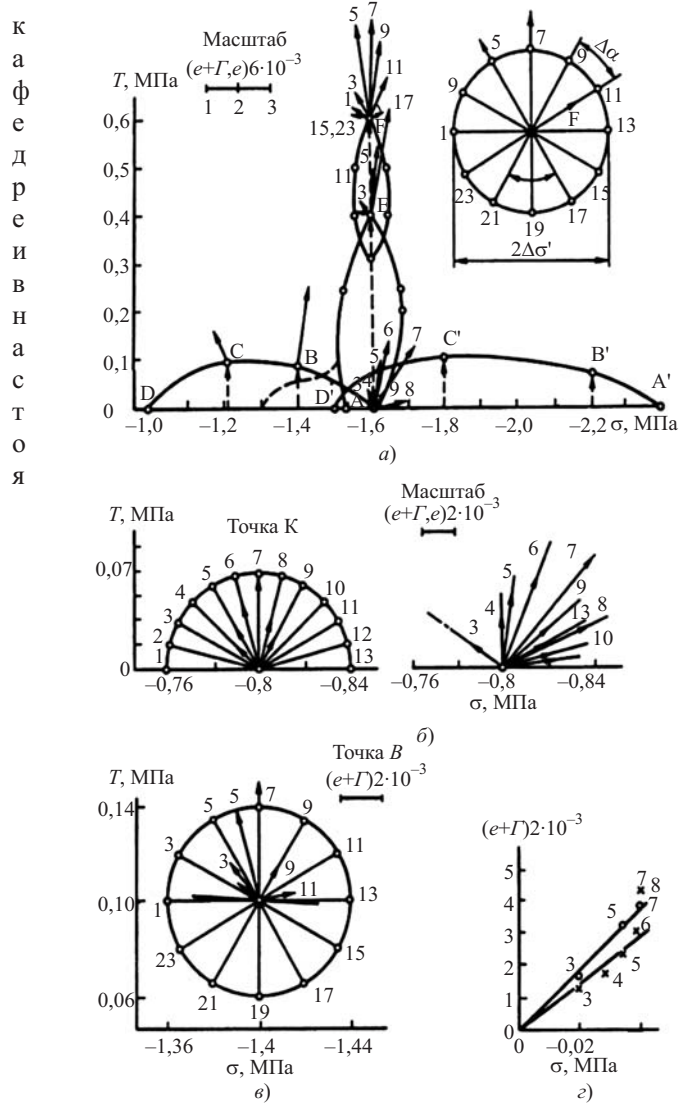
(плита занимала около 50 % ширины основания плотины), выравнивающей деформационные свойства основания.

Тогда же были проведены аналогичные исследования Кировской плотины на р. Талас в Киргизии и плотины Лас Мерседес на Кубе.

На основе различных статических и динамических исследований массивно-контрфорсных плотин защитили кандидатские диссертации С. С. Аракелян, М. Г. Зерцалов, В. Н. Ломбардо, Г. Э. Шаблинский, и Г. И. Шимельмиц.

Прошло уже около 40 лет, но участники исследований Кампыр-Раватской плотины с восторгом их вспоминают. Эти исследования помогли профессионально вырасти и профессорам, и научным сотрудникам, и аспирантам, и инженерам, и лаборантам, и студентам (на строительстве плотины проводились производственные практики студентов). Думаю, что если одна из организаций гидротехнического строительства ОАО “РусГидро” поручит нашему факультету вести полноценные исследования по-какому либо объекту (к примеру, Эвенкийской ГЭС), то это станет новым витком качественной подготовки специалистов для гидротехнической отрасли. Нельзя забывать, что подготовка и становление инженера формируется, в том числе, и при прохождении производственной практики. Увидеть сооружения в процессе возведения, поучаствовать в этом, почувствовать запах бетона и дыхание грандиозного строительства — необходимые элементы обучения студента.

За последние 30 лет под научным руководством Л. Н. Рассказова аспиранты кафедры защитили более 25 кандидатских диссертаций. Кандидаты техн. наук А. С. Бестужева и М. П. Саинов остались работать на



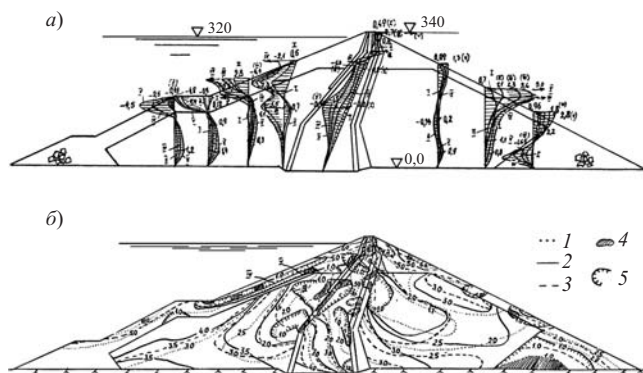
**Рис. 5.** Поверхности нагружения:

a — движение поверхности нагружения; б — “верное” нагружение, осевые и полные деформации (точка А — сигулярная на гидростатической оси); в — “верное” нагружение в регулярной точке; г — полные деформации и полное напряжение

шее время являются ведущими преподавателями. Под руководством профессора В. Г. Орехова защитили кандидатские диссертации В. В. Толстикова и Н. А. Анишкин, который в 2009 г. защитил докторскую диссертацию. Теперь они работают на кафедре преподавателями.

В 1970-х гг. на кафедре под руководством профессора П. И. Гордиенко было создано еще одно научное направление — сейсмостойкость гидротехнических сооружений. С ним работали будущий доктор техн. наук, профессор Г. Э. Шаблинский, кандидаты техн. наук В. Ф. Иванищев, Ф. Л. Доронин, инженер Ф. Д. Коновалов и др. Работа была построена на исследованиях моделей плотин или других сооружений (к примеру, здания атомных электростанций) на сеймоплатформах. Спустя 15 лет в КНР я видел множество подобных конструкций сеймоплатформ, которые управлялись компьютерами. Естественно, в начале





**Рис. 7.** Горизонтальные перемещения (а) и распределение  $K_n$  в теле плотины (б) после девятибалльных нагружений:

1 — после первого нагружения; 2 — после третьего нагружения; 3 — после пятого нагружения

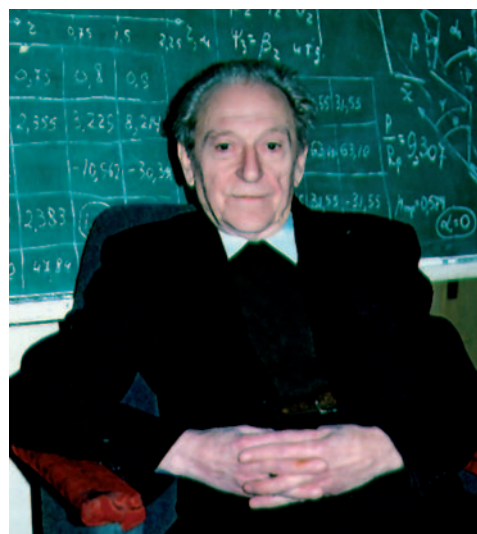
дования (3D) бетонных и грунтовых плотин (уравнения практически одни) в нестационарной постановке (плотина в третьем понижении Колымской ГЭС), они позволили уточнить движение границы талой зоны плотины во времени.

Решение нестационарной задачи фильтрации использовалось для оценки работоспособности отсечной каменной призмы Северной ПЭС. Эти исследования показали, что однородная каменная призма для нужд ПЭС неработоспособна. Она должна содержать противофильтрационный элемент (профессор, доктор техн. наук Н. А. Анискин).

Статические исследования плотин в пространственной и нелинейной постановке выявили много особенностей в работе грунтовых плотин, прежде всего возможность гидравлического разрыва ядра (экрана), что позволило установить причины аномального поведения плотины Курейской ГЭС и провести ремонтные работы. Аналогичные исследования выявили проблемы в плотине Колымской ГЭС.

Огромное значение имели исследования положения и свойств поверхности нагружения (теория Друкера, 1947 – 1949 гг.) при сложнапряженном состоянии грунта (рис. 6). Работа была выполнена и опубликована совместно с В. А. Иоселевичем (Институт механики МГУ). Исследования показали, что поверхность нагружения выполняет только одну функцию, являясь границей между упругой и упруго-пластической зоной в поле напряжений. Об этом, впрочем, предупреждал и сам Друкер, но потом под воздействием, видимо, Прагера, они опубликовали совместную статью о возможности применения этого постулата (о поверхности нагружения) к грунтам (рис. 6).

Исследования сейсмостойкости плотин теперь проводятся также численными методами, как во всех ведущих странах с развитой гидротехнической отраслью (рис. 7). В пространственной постановке решаются задачи с учетом “бегущей волны”, т.е. учитывается время пробегания сейсмической волны в основании плотины (как конструкции 3D, но фронт “бегущей волны” плоский). Это совершенно естественно, так



Профессор, доктор техн. наук В. Г. Орехов

как фронт сейсмической волны обычно намного шире плотины. Решаются также задачи при движении волны из верхнего бьефа в нижний, от борта к борту и вообще под любым углом к оси створа. Эти исследования открывают новые особенности в работе плотин.

Исследования бетонных плотин проводятся также в нелинейной постановке, так как учитываются раскрытие контактного шва с основанием плотины, работа межсекционных швов, появление и движение трещин в основании и плотине. Исследования движения трещин разработаны и выполнены профессором, доктором техн. наук В. Г. Ореховым на основе “механики разрушения”.

Еще раньше (в конце 1950-х гг.) болгарский аспирант Х. Ганев (руководитель П. И. Гордиенко) разработал оригинальный метод статического расчета арочных плотин, построенный на основе строительной механики, — метод арок-консолей как перекрестной системы.

В 70 – 90-е гг. прошлого века только на основе исследований грунтовых плотин кафедра выпустила более 25 кандидатов техн. наук (из них более 10 аспирантов из различных стран мира). Эти исследования стали вехами в исследованиях плотин, а работа кандидата техн. наук В. Г. Желанкина, который ввел в решение напряженно-деформированного состояния плотин основы теории вероятности, остается достаточно новой и сейчас, хотя прошло уже около 30 лет. На кафедре была развита методика оптимизации применительно к поиску оптимальных конструкций гидротехнических сооружений (доктор техн. наук Л. Н. Рассказов).

Кафедра гидротехнических сооружений постоянно разрабатывала и разрабатывает учебные планы и рабочие программы для гидротехнической специальности, паспорт специальности, УМКД дисциплин, читаемых преподавателями кафедры и т.д. Профессор кафедры, кандидат техн. наук В. В. Малаханов разработал стандарт высшего образования по специальности 290400 “Гидротехническое строительство” для инженеров, ба-



Современный состав кафедры гидротехнических сооружений.

Слева направо: М. П. Саинов, В. В. Толстиков, Н. А. Анискин, В. В. Малаханов, А. С. Бестужева, Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов.

кавалеров и магистров. В 2008 г. вышел в свет новый двухтомный учебник “Гидротехнические сооружения”.

Сотрудники кафедры гидротехнических сооружений пользуются неизменным авторитетом и в нашей стране, и за рубежом. Их часто приглашают для консультаций и чтения лекций в такие страны, как Алжир, Вьетнам, КНР, Йемен, Чехия, Иран, Сирия и др. Особенно эта деятельность активизировалась за последние 15 лет.

Кафедра гидротехнических сооружений готовит инженеров-гидротехников, специализирующихся в области речных гидросооружений. Инженеры, закончившие факультет гидротехнического и специального строительства Московского государственного строительного университета (МГСУ) по кафедре гидротехнических сооружений, — специалисты широкого профиля. Они работают на изысканиях, в проектных и научно-исследовательских институтах, на административных должностях, занимаются ремонтом и эксплуатацией построенных гидротехнических сооружений.

Россия — крупнейшая водная держава, на ее территории находятся 300 тыс. озер и свыше 150 тыс. рек. Крупных рек — 50 (протяженность свыше 1000 км). Средний годовой сток рек страны составляет 12 % общего речного стока земного шара. Потенциальный запас гидроэнергии составляет 11 % мировых гидроэнергетических ресурсов.

Практически факультет гидротехнического и специального строительства выпускает ежегодно (с 1995 г.) 50 инженеров-гидротехников.

Несмотря на заметный спад активности в области гидротехнического строительства, нашу страну ждет новый гидротехнический бум, так как требуется построить в 3 – 4 раза больше мощностей ГЭС чем было построено, чтобы достичь уровня цивилизованных стран. Надо больше выпускать инженеров-гидротехников (в 2010 г. наш факультет выпустил 47 инженеров) и лучше их готовить. Они будущее энергетического строительства России.

## Кафедра подземного строительства и гидротехнических работ

Зерцалов М. Г., заведующий кафедрой, заслуженный работник  
высшей школы РФ, профессор, доктор техн. наук



Зерцалов М. Г.

Интенсивное восстановление и развитие народного хозяйства Советского Союза после самой разрушительной в истории человечества войны требовали значительного увеличения объёма производимой в стране электроэнергии. Руководство страны приняло решение приступить к комплексному освоению крупных рек европейской части СССР: Волги, Днепра,

Дона. Для выполнения этого грандиозного плана было необходимо решить ряд сложнейших технических проблем, таких как научное обоснование проектирования и строительства гигантских плотин, гидроэлектростанций и речных портов на слабых грунтах, перекрытия крупнейших европейских рек; освоение значительных объемов земляных и бетонных работ; развития специальных методов возведения сооружений, в частности, средствами гидромеханизации; внедрение новейших технологий производства бетона, его транспортировки и укладки. Для решения этих задач были необходимы кадры, особенно инженерно-гидротехнические, способные на месте решать вопросы производства и организации гидротехнического строительства.

С целью удовлетворения потребностей в специалистах в 1955 г. в составе факультета гидротехнического строительства Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева была организована кафедра производства и организации гидротехнических работ (с 1998 г. кафедра подземного строительства и гидротехнических работ).

На протяжении 55 лет коллектив кафедры развивает и приумножает традиции научно-педагогической деятельности, заложенные выдающимися гидротехниками И. И. Кандаловым, В. С. Эристовым, И. В. Комзиным, Г. Д. Петровым, В. М. Московым, которые внесли значительный вклад в теорию и практику отечественного гидротехнического строительства.

Со дня основания в 1955 г. по 1958 г. кафедру возглавлял доцент П. В. Бородин. В сферу научных проблем кафедры входили вопросы развития теории и практики фронтального и пионерного перекрытия русел крупных рек, совершенствования технологии бетонирования массивных сооружений, применения средств гидромеханизации в гидротехническом строительстве. В эти годы на кафедру пришли профессор Б. А. Волнин, доценты

П. А. Навроцкий, С. Г. Ефимов, в лекциях которых концентрировался передовой опыт производства и организации строительства речных и морских гидротехнических сооружений.

В 1959 г. кафедру возглавил крупный производственник и ученый, строитель Днепрогэса, профессор И. И. Кандалов, заложивший научные основы организации строительства гидроэлектростанций и технологии производства основных гидротехнических работ. И. И. Кандаловым в это время написаны и изданы учебники “Организация строительства гидроэлектростанций” и “Технология производства основных работ при возведении гидроэнергоузлов”. Под руководством профессора Б. А. Волнина получили развитие вопросы теории и практики гидромеханизации земляных работ и намыва грунтовых сооружений. Результаты этих исследований широко использовались при строительстве многих гидротехнических объектов. Учитывая объём, который занимала гидромеханизация в технологии гидротехнического строительства, на факультете была открыта специализация “Намывные гидротехнические сооружения”. Кафедра становится выпускающей. В этот период на кафедре приступили к работе в качестве преподавателей и научных сотрудников кандидаты техн. наук А. К. Третьяков, А. И. Чураков, Д. В. Чаплыгин, инженер А. В. Филонидов, успешно совмещавшие преподавательскую и научную деятельность. Так, А. К. Третьяков и А. В. Филонидов активно внедряли на ряде гидроэнергетических объектов неразрушающие методы испытаний бетона с помощью ультразвука и закладывали научные основы ультразвукового контроля качества бетона.

С 1963 по 1975 г. кафедру возглавлял крупный ученый и производственник, лауреат Сталинской премии, заслуженный строитель РСФСР, профессор В. С. Эристов. Под его руководством, наряду с развитием традиционных для кафедры научных направлений, в связи с началом возведения высоконапорных гидроузлов в горных условиях начинается интенсивное исследование вопросов, связанных со строительством подземных гидротехнических сооружений. Формируется научная школа по подготовке исследователей в области подземного гидротехнического строительства. Интенсивно изучаются вопросы статического и динамического взаимодействия подземных сооружений с породными массивами, развивается механика скальных пород, внедряются новые, прогрессивные методы расчета подземных гидротехнических сооружений, прово-



дятся натурные исследования обделок деривационных туннелей и подземных машзалов ГЭС. В этот период на кафедру приходят крупные производственники — организаторы гидротехнического строительства: профессор И. В. Комзин, возглавлявший строительство Куйбышевского и Асуанского гидроузлов; профессор, доктор техн. наук Г. Д. Петров, много лет проработавший заместителем главного инженера Гидропроекта по производству и организации гидротехнического строительства. Вместе с ними на кафедре работали известные специалисты кандидаты техн. наук В. И. Абхази, Б. А. Кулыгин и молодые преподаватели Ю. Е. Хечинов, С. А. Юфин, А. М. Морозов.

В эти годы под председательством профессора В. С. Эрстова кафедрами гидротехнического факультета совместно с ведущими кафедрами института был выполнен комплекс исследований для Кампыр-Раватского, а позднее Андижанского гидроузла.

В 1972 г. в связи с проектированием и строительством высоконапорных гидроузлов в горных районах на кафедре создается под руководством В. С. Эрстова новая специализация “Подземные гидротехнические сооружения” и кафедра начинает подготовку и выпуск специалистов подземного гидротехнического строительства. Выпускники кафедры этого профиля были очень востребованы проектными и строительными организациями (Гидропроектом, Гидроспецпректом, Гидроспецстроем, Гидроспецфундаментстроем), их приглашали на строительства различных гидроузлов. Одновременно на кафедре активизировалась подготовка аспирантов подземной специализации, в том числе из развивающихся зарубежных стран. Преподаватели кафедры принимали активное участие в проектировании и строительстве крупных гидроэлектростанций: Ингурской, Колымской, Вилнойской, Токтогульской. Специалисты кафедры участвовали в государственной экспертизе крупных гидроэнергетических объектов, вели активную работу в Национальном комитете по большим плотинам.

В этот же период на кафедре также интенсивно развивались и другие научные направления: механизация бетонных работ (профессор Г. Д. Петров, доценты Д. В. Чаплыгин, А. К. Третьяков, С. Г. Ефимов); специальные виды работ в гидротехническом строительстве (доцент А. И. Чураков); строительство намывных гидротехнических сооружений и внедрение методов гидромеханизации (профессор Б. А. Волнин, доцент В. И. Абхази); строительство морских гидротехнических сооружений (доцент П. А. Навроцкий, С. Г. Ефимов). В 1972 г. на кафедру пришел известный специалист, принимавший участие в проектировании и строительстве многих гидроузлов, в том числе Асуанско-

го, кандидат техн. наук В. Я. Шайтанов, позже защитивший докторскую диссертацию и ставший профессором кафедры. Продолжалось совершенствование учебного процесса. Под редакцией В. С. Эрстова коллективом кафедры подготовлены и выпущены в свет основополагающие учебные пособия “Производство гидротехнических работ” (1970) и “Организация и планирование гидротехнического строительства” (1976); разрабатывались новые программы дисциплин по гидромеханизации, производству и организации гидротехнических работ, подземным гидротехническим сооружениям и производству подземных гидротехнических работ. Сотрудниками кафедры к тому времени опубликованы более 200 монографий, брошюр, статей, нормативных документов, методических указаний и пособий, способствующих дальнейшему развитию строительного образования студентов гидротехнического факультета. Научные зарубежные стажировки прошли кандидаты техн. наук Ю. Е. Хечинов (Франция) и С. А. Юфин (США).

С 1975 по 1981 и с 1981 по 1982 г. кафедрой соответственно руководили доценты, кандидаты техн. наук А. К. Третьяков и А. И. Чураков. В этот период продолжали развиваться специализации “Намывные гидротехнические сооружения”, “Подземные гидротехнические сооружения”, производилась подготовка специалистов по технологии общестроительных гидротехнических и специальных работ, строительству и проектированию подземных гидротехнических сооружений. На кафедре работали доценты В. А. Кулыгин, В. А. Белов, А. М. Морозов, выполнявший одновременно с активной преподавательской деятельностью функции заместителя декана факультета. В эти годы на кафедре успешно продолжал работать закончивший аспирантуру и защитивший кандидатскую диссертацию доцент Е. И. Жохов, на кафедру после окончания гидротехнического факультета пришли инженеры А. А. Антипов, В. В. Санчугов, О. К. По-стольская. Доцент А. И. Чураков выпустил учебное пособие “Производство специальных работ в гидротехническом строительстве” (1976), А. К. Третьяков опубликовал пятое издание учебника для техникумов “Бетонные работы”, по которому училась целая плеяда студентов среднего технического образования; под редакцией А. И. Чуракова издаётся учебник “Производство гидротехнических работ”. В это время начали интенсивно использоваться компьютерные методы расчетов при проектировании подземных сооружений (доцент С. А. Юфин). После защиты докторской диссертации, получив звание профессора кафедры, С. А. Юфин был избран как представитель нашей страны членом Совета Международной ассоциации по компьютерным методам и развитию в геомеханике (IACMAG). В

эти же годы он работал в качестве приглашенного профессора в зарубежных университетах и исследовательских центрах.

В 1982 г. на должность заведующего кафедрой был приглашен известный специалист в области подземного строительства профессор, доктор техн. наук В. М. Мостков. Под его руководством продолжали активно развиваться научные исследования в области подземного гидротехнического строительства, выполнялись актуальные работы, связанные с развитием способов расчета подземных сооружений на ЭВМ, с технологией производства подземных работ и креплений подземных выработок крупного сечения.

В этот период на кафедре работали кандидат техн. наук, профессор, заслуженный строитель РСФСР Л. А. Толкачев; крупный специалист в области производства и организации гидротехнического строительства профессор, доктор техн. наук Л. И. Кудояров, в области гидромеханизации — профессор, доктор техн. наук А. И. Харин. На кафедру был приглашен также специалист в области технологии подземного строительства доцент, кандидат техн. наук П. Д. Степанов. Специалисты кафедры принимали участие в разработке нормативных документов (СНиП и ВСН), опубликованы статьи и монографии. Коллективом авторов кафедры (В. М. Мостков, П. Д. Степанов, Ю. Е. Хечинов, С. А. Юфин) под редакцией В. М. Мосткова подготовлен и издан учебник “Подземные гидротехнические сооружения” (1986). На кафедре велась большая научно-исследовательская деятельность, осуществлялся переход на новые учебные планы, активизировалась методическая работа, совершенствовался учебный процесс, производственная практика, аудитории оснащались макетами и образцами бурового оборудования. С приходом на кафедру профессора, доктора техн. наук А. И. Харина более интенсивно стала развиваться специализация “Намывные гидротехнические сооружения”. Вышло в свет учебное пособие профессора Л. А. Толкачева “Современные методы бетонирования высоких плотин” (1988). В 1991 г. на кафедру возвратился доктор техн. наук, профессор Ю. Е. Хечинов, проработавший несколько лет в должности заместителя главного инженера управления строительства Ингурской ГЭС по строительству подземных сооружений. Практический опыт, приобретённый на строительстве, он активно использовал в своей преподавательской деятельности. В это же время Ю. Е. Хечинов помимо специальной литературы написал ряд художественных произведений на исторические темы, которые имели успех у читательской аудитории. Ю. Е. Хечинов был избран членом Союза писателей г. Москвы.

В начале 1990-х гг. в связи с резким сокращением в стране объёма гидротехнического строительства по инициативе заведующего кафедрой профессора, доктора техн. наук В. М. Мосткова на факультете была открыта новая специализация “Подземные сооружения промышленно-гражданского назначения”. Открытие этой специализации позволило выпускникам кафедры активно включиться в работы, связанные с освоением подземного пространства г. Москвы. Руководство подготовкой инженеров по данной специализации осуществляли профессор С. А. Юфин и доцент О. К. Постольская.

С 1995 г. по настоящее время кафедрой руководит заслуженный работник высшей школы РФ, профессор, доктор техн. наук М. Г. Зерцалов, совмещавший в течение пятнадцати лет заведывание кафедрой сначала с должностью декана факультета ГСС, а впоследствии с должностью директора ИЭВПС МГСУ. В 90-е гг. в связи с организацией отраслевых академий ряд сотрудников кафедры избираются их действительными членами. Профессора В. М. Мостков, Л. И. Кудояров, М. Г. Зерцалов избираются действительными членами Академии водохозяйственных наук, профессор А. И. Харин избирается действительным членом Инженерной академии, профессор С. А. Юфин — действительным членом Международной академии информатизации. В эти же годы начинается сотрудничество с кафедрой крупного специалиста в области подземного строительства, получившего признание как в нашей стране, так и за рубежом, заслуженного строителя РФ, профессора, доктора техн. наук В. Е. Меркина. Его знания и опыт, а также блестящие лекторские способности во многом способствовали совершенствованию курса лекций по дисциплине “Технология возведения подземных сооружений”.

В середине 90-х гг. прошлого века многие гидротехнические сооружения, построенные в 1930 – 40-х гг., пришли в состояние, требующее ремонта или реконструкции. С учетом этого, по инициативе профессора А. И. Харина на кафедре создана специализация “Ремонт и восстановление водных объектов”. Вскоре после преждевременного ухода из жизни профессора А. И. Харина его работу продолжил профессор Ю. Е. Хечинов, сумевший обеспечить в кратчайшее время создание учебного комплекса дисциплин для этой специализации. В настоящее время эту специализацию курирует пришедший в 2007 г. на кафедру известный инженер-гидротехник, строитель Братской и Красноярской ГЭС, ведущий научный сотрудник РАН, профессор, доктор техн. наук А. Н. Марчук. Его многолетний производственный опыт позволил приблизить учебные дисциплины специализации к

практике строительства и отразить в них современные методы ремонта и реконструкции гидротехнических объектов. С 2003 г. на кафедре работает выпускник факультета профессор Е. А. Корчагин — известный специалист в области технологии сооружения морских гидротехнических сооружений, автор многочисленных научных и учебно-методических публикаций в этой области строительства.

В настоящее время кафедра является выпускающей по двум специализациям: “Подземные сооружения промышленно-гражданского назначения” (специальность 270102 ПГС) и “Ремонт и восстановление водных объектов” (специальность 270104 ГС). Кроме того, по специальности “Гидротехническое строительство” на всех специализациях факультета преподаватели кафедры читают дисциплины по производству и организации гидротехнических работ. Кафедра выпускает каждый год в среднем 40 – 45 человек по специальности 270102 и 12 – 15 человек по специальности 270104, что составляет около 1/3 ежегодного выпуска факультета ГСС.

На кафедре сейчас работают 13 преподавателей (8,25 штатных единиц; 7,75 — бюджетных средств и 0,5 внебюджетных). По дисциплинам специальности 270104 занятия ведут пять преподавателей, по специальности 270102 — восемь преподавателей.

Коллектив кафедры постоянно проводит работу по подготовке и воспитанию молодых кадров преподавателей. За последние пятнадцать лет на кафедру пришли, закончив аспирантуру и защитив кандидатские диссертации, выпускники кафедры, взявшие на себя учебную нагрузку по дисциплинам специализации “Подземные сооружения промышленно-гражданского назначения” на дневном, вечернем и заочном отделениях. В их числе профессор Д. С. Конюхов, выполняющий в настоящее время обязанности заместителя заведующего кафедрой; доцент А. В. Манько, работающий одновременно заместителем декана факультета ГСС; доценты Е. В. Ламонина; И. Р. Швачко; старшие преподаватели кандидаты техн. наук А. А. Привалов, Д. В. Устинов, М. В. Никишкин.

Практически все читаемые кафедрой дисциплины обеспечены, подготовленной сотрудниками кафедры, учебно-методической литературой. Изданы учебные пособия профессора Д. С. Конюхова “Использование подземного пространства” (2004), “Строительство городских подземных сооружений мелкого заложения” (2005). Вышло в свет учебное пособие “Подземные сооружения”, написанное авторским коллективом (В. П. Абрамчук, С. Н. Власов, В. М. Мостков), основанное на материалах, собранных и подготовленных профессором В. М. Мостковым незадолго до его ухода из жизни;

напечатано второе издание учебника “Механика скальных грунтов” профессора М. Г. Зерцалова (2006). В 2007 г. опубликована монография профессора А. Н. Марчука “Плотины и геодинамика (опыт натуральных наблюдений)”. В 2008 г. выходит из печати монография профессора Е. А. Корчагина “Оптимизация конструкций портовых и причальных стенок”. В 2009 г. издаётся монография доцента А. В. Манько “Организация оптимального мониторинга среды подземного сооружения”. В январе 2010 г. профессор А. Н. Марчук издаёт монографию “Натурные наблюдения на плотинах в сейсмических районах”. В этом же году в процессе подготовки к празднованию 55-летнего юбилея кафедры и 85-летия со дня рождения профессора В. М. Мосткова издаётся после почти тридцатилетнего перерыва подготовленный сотрудниками кафедры совместно с коллективом авторов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета учебник “Производство гидротехнических работ”. В написании второй части учебника “Производство специальных работ” и частично первой части “Производство бетонных и земляных работ” принимали участие все ведущие преподаватели кафедры. Издано также учебное пособие “Объёмно-планировочные решения городских подземных сооружений”, авторы которого профессора В. М. Мостков и С. А. Юфин не успели его закончить. Учебное пособие закончил, отразив последние достижения в области освоения подземного пространства, отредактировал и подготовил к печати ученик В. М. Мосткова и С. А. Юфина старший преподаватель Д. В. Устинов. Вышла в свет подготовленная авторским коллективом под руководством ректора МГСУ профессора В. И. Теличенко монография “Современные технологии комплексного освоения подземного пространства мегаполисов”. В составе коллектива авторов принимали активное участие в написании монографии профессора кафедры М. Г. Зерцалов и Д. С. Конюхов.

Сотрудники кафедры регулярно публикуют научные статьи и предоставляют доклады на российские и международные конференции в области гидротехнического строительства, механики скальных грунтов и освоения подземного пространства.

Отмечая 80-летний юбилей факультета, коллектив кафедры подземного строительства и гидротехнических работ, сохраняя традиции, заложенные предшественниками, и в дальнейшем приложит все силы для совершенствования учебного процесса, подготовки квалифицированных специалистов и более активного участия сотрудников в научно-исследовательской деятельности. К этому нас также обязывает присвоение МГСУ почётного статуса “Национальный исследовательский университет”.

# Устойчивость откосов грунтовой плотины с учётом пространственных условий восприятия нагрузок

Саинов М. П., кандидат техн. наук, Карбивник Н. А., инженер (МГСУ)

Устойчивость откосов — самый важный вопрос проектирования грунтовых плотин. Чаще всего для расчёта устойчивости откосов используется метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, в котором за поверхность скольжения принимается цилиндрическая поверхность с образующей в виде дуги окружности. Соответственно задача решается в плоской постановке, а пространственный характер работы сооружения не учитывается. Это удобно для инженерных расчётов, так как, с одной стороны, существенно упрощает решение задачи, а с другой — обеспечивает дополнительный запас устойчивости: пространственный массив обрушения будет более устойчив, чем его плоское сечение.

Однако можно предположить, что не всегда в пространственных условиях устойчивость откоса будет выше, чем в плоских. Чтобы доказать это, рассмотрим вопрос об устойчивости откосов высокой грунтовой плотины, возведённой в узком горном ущелье, когда эффект пространственности сильно выражен. Для напряжённого состояния таких плотин характерно проявление арочного эффекта, при котором плотина “зависает” на бортах. Из-за арочного эффекта удерживающие откос силы трения уменьшаются, поэтому можно ожидать, что запас устойчивости откоса может оказаться меньше, чем в плоских условиях.

Исследование устойчивости откосов будем проводить по обычной методике — для плоского сечения плотины, но модифицируем её таким образом, чтобы можно было учесть влияние арочного эффекта. За основу возьмём метод Терцаги, наиболее часто используемый в проектной практике. В этом методе коэффициент устойчивости откоса определяется как отношение момента удерживающих сил к моменту опрокидывающих сил. В качестве удерживающих выступают силы трения и сцепления вдоль поверхности скольжения, а в качестве опро-

кидывающих — силы собственного веса сооружения и сейсмические силы. Для подсчёта моментов массив обрушения разбивается на ряд вертикальных отсеков. В результате формула для определения коэффициента устойчивости записывается в виде

$$k_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ (G_i - W_i) \operatorname{tg} \varphi_i \cos \alpha_i + c_i \frac{b}{\cos \alpha_i} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[ G_i \sin \alpha_i + S_i \frac{r_i}{R} \sin \alpha_i \right]}$$

где  $G_i$  — вес грунта в  $i$ -том отсеке;  $W_i$  — объёмная взвешивающая сила в  $i$ -том отсеке;  $\varphi_i$  — угол внутреннего трения грунта на подошве  $i$ -го отсека;  $c_i$  — удельное сцепление грунта, залегающего на подошве  $i$ -го отсека;  $\alpha_i$  — угол наклона подошвы  $i$ -го отсека;  $S_i$  — горизонтальная сейсмическая сила в  $i$ -том отсеке;  $r_i$  — плечо силы сейсмической силы  $S_i$  в  $i$ -том отсеке;  $b$  — ширина отсека;  $R$  — радиус кривой скольжения.

В этой формуле величину  $G_i - W_i$  можно представить в виде  $\sigma_y \cdot b$ , т.е. выразить через вертикальные напряжения  $\sigma_y$  в скелете грунта на площадке скольжения. Эти напряжения можно взять из расчёта напряжённо-деформированного состояния плотины, что позволит учесть перераспределение напряжений внутри плотины: между ядром и упорными призмами, между центральным и прибортовыми сечениями плотины. Тогда мы сможем учесть влияние пространственных условий на устойчивость её откосов.

Для расчётов была составлена специальная вычислительная программа. В ней плотина разбита не на вертикальные отсеки, а на конечные элементы.

Исследование было проведено на примере каменно-земляной плотины высотой 163 м, возводи-

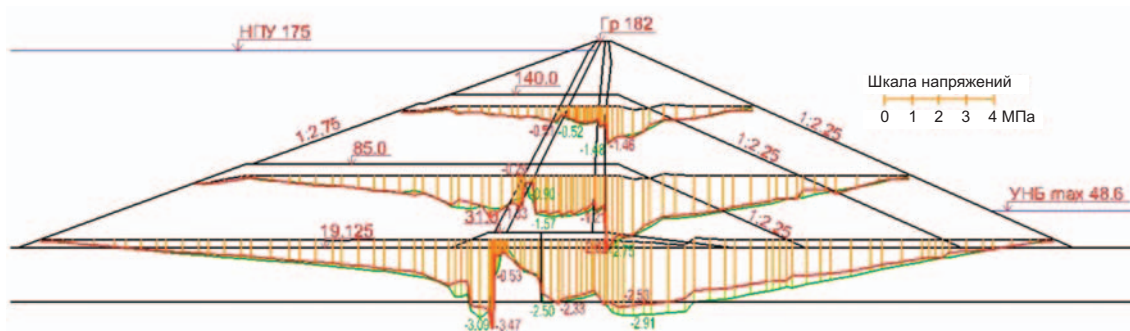
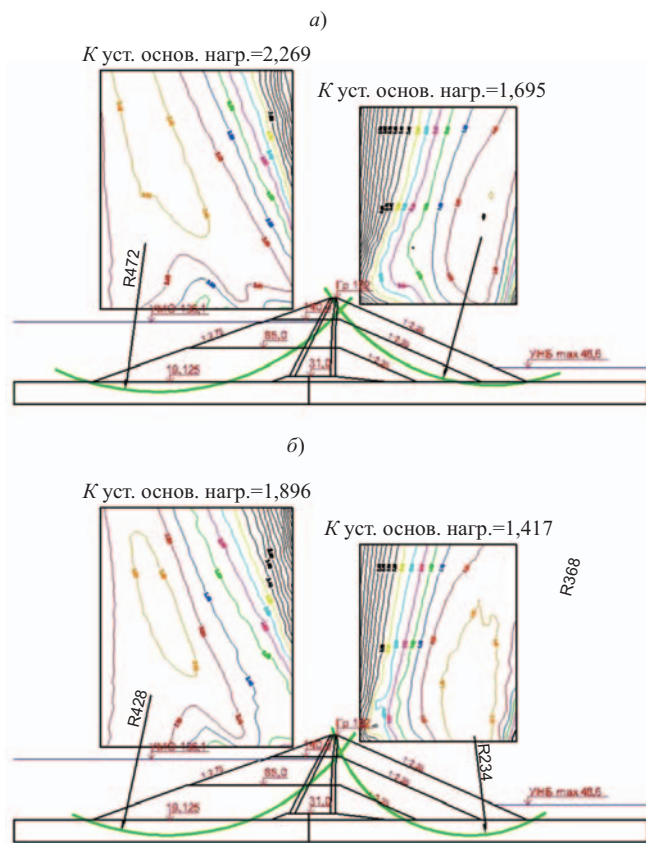


Рис. 1. Распределение вертикальных напряжений в центральном сечении плотины: красным показаны эпюры для пространственного случая, зелёным — для плоского



**Рис. 2.** Наиболее опасные кривые скольжения при расчёте устойчивости откосов на статические нагрузки: *а* — плоские условия, *б* — пространственные условия

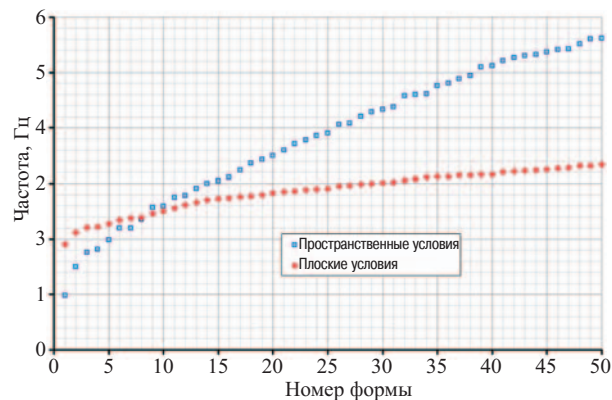
мой в ущелье шириной 570 м. Плотина — каменно-земляная с наклонным ядром и упорными призмами из горной массы. Основанием русловой части плотины служит слой аллювиального грунта толщиной 43 м. Заложения откосов плотины приняты следующими: низового — 2,0, верхового — 2,75.

Для выявления влияния пространственности решались две задачи:

напряжённое состояние сечения плотины соответствует плоским условиям;

напряжённое состояние сечения плотины берётся из решения пространственной задачи.

Соответственно были решены две задачи о напряжённо-деформированном состоянии (НДС) грунтовой плотины: в плоской и в пространственной постановках. Расчёты НДС производились по вычислительным программам, составленным на кафедре гидротехнических сооружений МГСУ кандидатом техн. наук М. П. Саиновым. Они позволили определить распределение вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в центральном сечении плотины. Эпюры напряжений  $\sigma_y$  для плоского и пространственного НДС показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что при учёте пространственной работы плотины за счёт зависания грунта на бортах происходит заметное снижение напряжений  $\sigma_y$  в нижней части плотины и основании.



**Рис. 3.** Частоты собственных колебаний плотины

Расчёты устойчивости для низового откоса производились при максимальном уровне верхнего бьефа, для верхового — при УСВ. Принятые физико-механические свойства грунтов указаны в таблице.

При расчётах учитывалось снижение угла внутреннего трения грунта с ростом напряжений в нём.

Расчёты устойчивости показали, что в пространственных условиях (рис. 2, *б*) коэффициенты устойчивости откосов существенно ниже, чем в плоских (рис. 2, *а*). При учёте пространственности коэффициент устойчивости низового откоса уменьшился с 1,70 до 1,42, верхового — с 2,27 до 1,90, т.е. примерно на 17 %.

Так как обычно в горных условиях, где строят высокие грунтовые плотины, проявляется сейсмическая активность, то расчёты устойчивости были проведены также с учётом сейсмических нагрузок. Сейсмичность района строительства была принята равной 9 баллов, а ускорение основания было принято равным 0,48 g.

Сейсмические нагрузки определялись по линейно-спектральной методике, поэтому для каждого случая потребовалось определить формы собственных колебаний грунтовой плотины. Формы колебаний рассчитывались по вычислительной программе, составленной на кафедре гидротехнических сооружений МГСУ. При расчётах учитывалось изменение динамических характеристик грунтов плотины с глубиной. Для плоских и пространственных условий работы плотины было определено по 50 форм собственных колебаний.

Частоты собственных колебаний плотины представлены на рис. 3, из которого видно, что в пространственной задаче спектр частот значительно уже (от 1,9 до 3,3 Гц), чем в плоской (от 1,0 до 5,6 Гц). В обеих задачах первая форма собственных колебаний — сдвиговая, с направлением колебаний из бьефа в бьеф. Остальные формы существенно различаются, причём в пространственном случае они более “слабые”, т.е. их вклад в инерционную нагрузку снижается. Тем не менее ускорение гребня плотины (относительно основания) в простран-

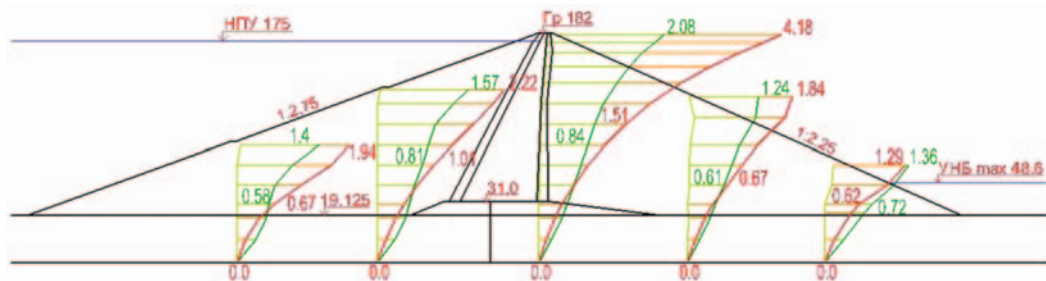


Рис. 4. Горизонтальные ускорения (относительно основания) в теле грунтовой плотины при сейсмическом воздействии: красным показаны эпюры для пространственного случая, зелёным — для плоского

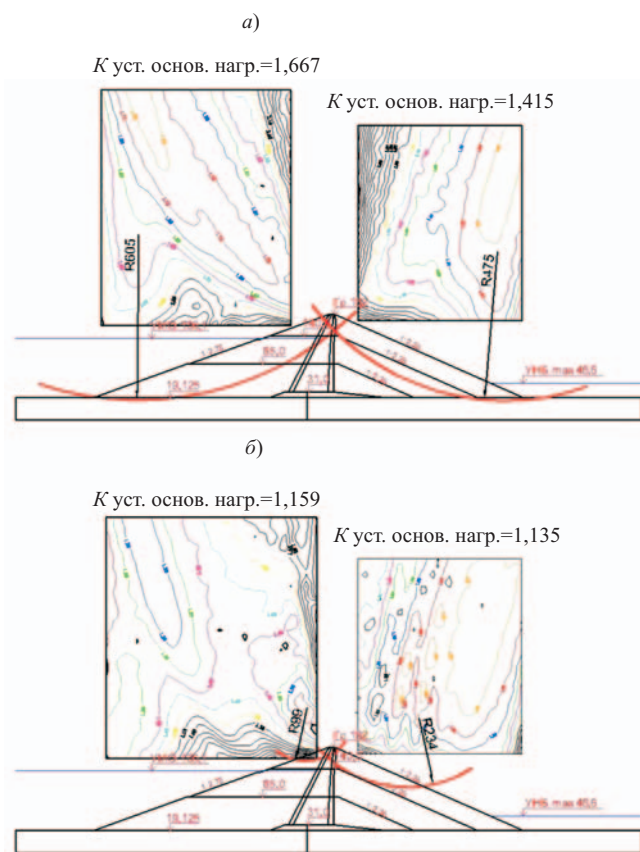


Рис. 5. Наиболее опасные кривые скольжения при расчёте устойчивости откосов с учётом сейсмических нагрузок. а — плоские условия, б — пространственные условия

ственной задаче получилось вдвое больше, чем в плоской. В плоской задаче оно равно  $2,1 \text{ м/с}^2$ , пространственной —  $4,2 \text{ м/с}^2$  (рис. 4). Это объясняется тем, что частоты собственных колебаний ближе к частотам колебаний основания. Поэтому сейсмическая нагрузка на центральное сечение плотины (максимальной высоты) в пространственных условиях оказалась больше, чем в плоских.

Это повлияло и на устойчивость откосов при сейсмическом воздействии (рис. 5). Коэффициент устойчивости низового откоса в плоских условиях составил 1,32, а в пространственных — 1,06; верхового — соответственно 1,66 и 1,20. В процентном отношении коэффициент устойчивости снизился

Грунт	Плотность, $\text{т/м}^3$		Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, кПа
	в сухом состоянии	в насыщенном состоянии		
Горная масса упорных призм	2,03	2,28	34 – 51	0,0
Глинистый грунт ядра		2,06	21	34
Грунт переходных зон	1,80	2,20	30	0
Гравийно-галечниковый грунт основания	–	2,33	36	0

на 20 % и более. Но важно то, что если в плоских условиях коэффициент устойчивости низового откоса больше нормативного, то в пространственных — близок к 1. Это показывает, насколько велико влияние пространственных условий работы плотины на устойчивость её откосов.

## Выводы

1. Устойчивость откосов высокой грунтовой плотины в узком каньоне может оказаться ниже, чем в плоских условиях, если учесть:

снижение вертикальных напряжений  $\sigma_y$  из-за появления эффекта “зависания” плотины на скальных бортах;

повышение сейсмических нагрузок вследствие изменения динамических характеристик плотины.

Этот вопрос требует дальнейших проработок.

2. Расчёт устойчивости откосов высоких грунтовых плотин при действии сейсмических сил должен вестись с учётом пространственных условий. Если створ плотины узкий, то частоты первых форм собственных колебаний повышаются и приближаются к частотам сейсмического воздействия. Для этих условий сейсмические нагрузки на плотину могут оказаться больше, чем в плоских условиях, что негативно скажется на устойчивости откосов.

## Вопросы механической суффозии в гидротехническом, промышленном и гражданском строительстве

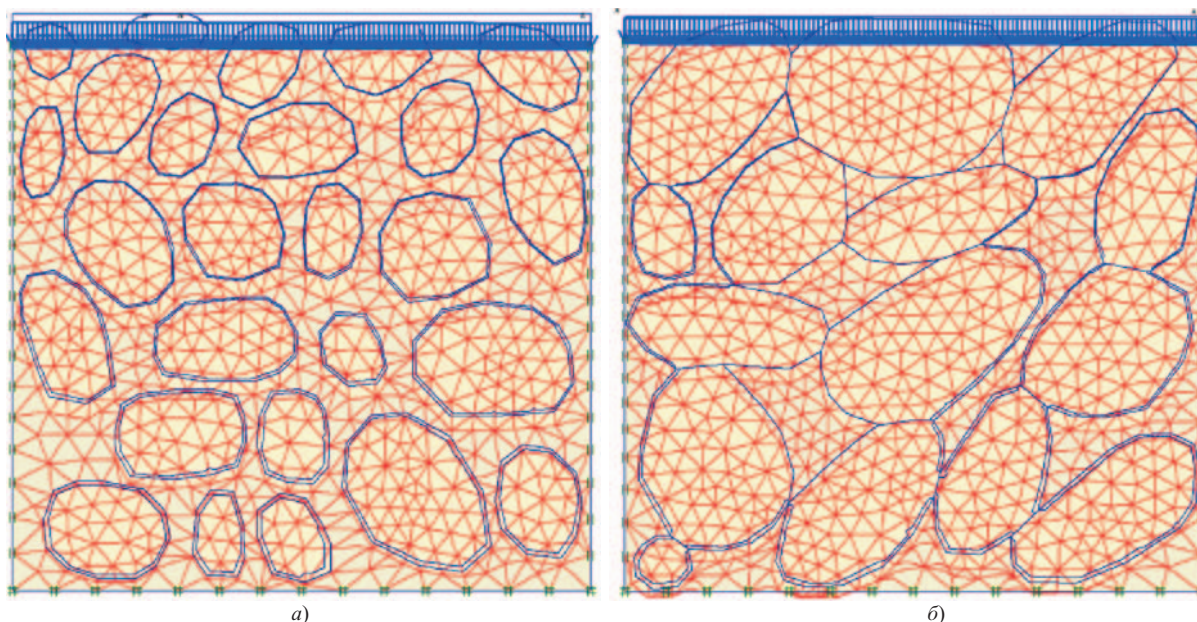
Тер-Мартirosян З. Г., доктор техн. наук, заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов (МГСУ)

В фильтрующих массивах грунтов, служащих основанием, средой или материалом различных сооружений, могут развиваться процессы механической суффозии под воздействием фильтрационной силы, сопоставимой с силой гравитации. Фильтрационные силы влияют на напряженно-деформированное состояние (НДС) фильтрующего массива в целом и на механическую суффозию в локальных областях массива, где имеются большие градиенты напора. В результате меняются гранулометрический состав грунта, его плотность, деформационные и прочностные свойства. Все это приводит к изменению НДС всего фильтрующего массива грунта и к концентрации НДС в локальных областях, а в результате — к фильтрационным деформациям (осадкам) и фильтрационному выпору.

Проблема фильтрационной деформации и устойчивости в гидротехническом строительстве решается правильным подбором грунтовых материалов, укладываемых в тело плотины; составов фильтров, переходных зон и дренажей, предотвращающих или минимизирующих механическую суффозию. Для оценки суффозионности грунтов, служащих основанием или материалом гидротехнических сооружений, в настоящее время используются методики ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и ВНИИВОДГЕО. По этим методикам основными факторами, влияющими на суффозионность грун-

тов, являются зерновой состав, скорость фильтрации и градиент напора. Особое внимание при этом уделяется определению коэффициента разнородности ( $\eta = d_{60}/d_{10}$ ), коэффициента неравномерности раскладки частиц ( $k = 1 + 0,05\eta$ ), значения диаметра частиц, которые могут быть вынесены фильтрационными потоками в результате суффозии ( $d_{ci}^{\max} = 0,77d_0^{\max}$ ) [2]. Если  $d_{ci}^{\max} < d_{cr}^{\min}$ , то грунт считается несуффозионным. Если  $d_{ci}^{\max} > d_{cr}^{\min}$ , то грунт является суффозионным и из такого грунта могут быть вынесены частицы, диаметр которых меньше  $d_{ci}^{\min}$ .

По методике ВОДГЕО значение разрушающего градиента суффозии для несвязных грунтов с коэффициентами разнородности  $\eta > 10$  оценивают следующим образом. Зерновой состав условно делят на скелет с диаметром частиц больше 1 мм и на заполнитель с диаметром частиц меньше 1 мм и строят для них кривые зернового состава. По этим кривым определяют  $d_{10}^{\text{ск}} > d_{10}^{\text{зап}}$ . В зависимости от этих диаметров, а также угла внутреннего трения заполнителя определяют значения разрушающего градиента  $i_c^{\text{раз}}$  по графику. Расчетные значения осредненного критического градиента напора  $i_{\text{cr.m}}$  в основании гидротехнических сооружений с дрена-



**Рис. 1.** Расчётная конечно-элементная схема для определения НДС представительного объёма неоднородного грунта и структуры неоднородного зернового состава песчаного грунта в зависимости от количественного соотношения мелких и крупных фракций: *a* — крупные фракции “плавают” в общей массе мелких фракций; *б* — мелкие фракции заполняют поры между крупными фракциями, которые имеют контакт между собой и образуют скелет

жем по СНиП 2.02.02–85 следует принимать по табл. 1.

Количественная оценка суффозионности грунтов по методикам ВНИИГ и ВОДГЕО обусловлена необходимостью обеспечения нормальных условий эксплуатации гидротехнических сооружений, в том числе необходимостью оценки суффозионного выноса грунта и размыва. Отмечается, что если допустить без ущерба для конструкции из грунта вынос мельчайших частиц от 3 до 5 % по массе, то такой грунт можно считать практически несуффозионным. Поэтому критерием несуффозионности считается условие  $d_{ci}^{max} < d_3 \dots d_5$ . Однако этим и ограничивается предложение по оценке влияния суффозии на сооружения из грунта. Очевидно, что для количественной оценки влияния суффозии грунтов оснований промышленных и гражданских сооружений (ПГС), которые более чувствительны к неравномерным осадкам, необходим новый подход, позволяющий обеспечить нормальные условия их эксплуатации.

Проблемы механической суффозии на основании ПГС возникли в последнее десятилетие в связи с интенсивным освоением подземного пространства, устройством глубоких (до 30 м) котлованов и водопонижением. Кроме того, с ростом глубины котлованов усиливается влияние суффозионно-карстовых явлений на глубоких горизонтах. Очевидно, при этом также потребуется количественная оценка влияния суффозии на механические свойства грунтов, т.е. на деформационные и прочностные свойства, необходимые для оценки НДС фильтрующего массива в целом и в отдельных частях.

С этой целью на кафедре МГрОиФ МГСУ в последние три года были выполнены специальные экспериментальные исследования для определения влияния суффозии на деформационные свойства песчаного грунта [1, 6, 7]. В ходе испытаний установлено, что процесс выноса твердых частиц фильтрационным потоком сопровождается осадкой образцов. Это так называемая внешняя защемленная механическая суффозия. Вынос частично или

Т а б л и ц а 1

Грунт	Расчетный средний критический градиент напора $i_{cr,m}$
Песок:	
мелкий	0,32
средней крупности	0,42
крупный	0,48
Супесь	0,60
Суглинок	0,8
Глина	1,35

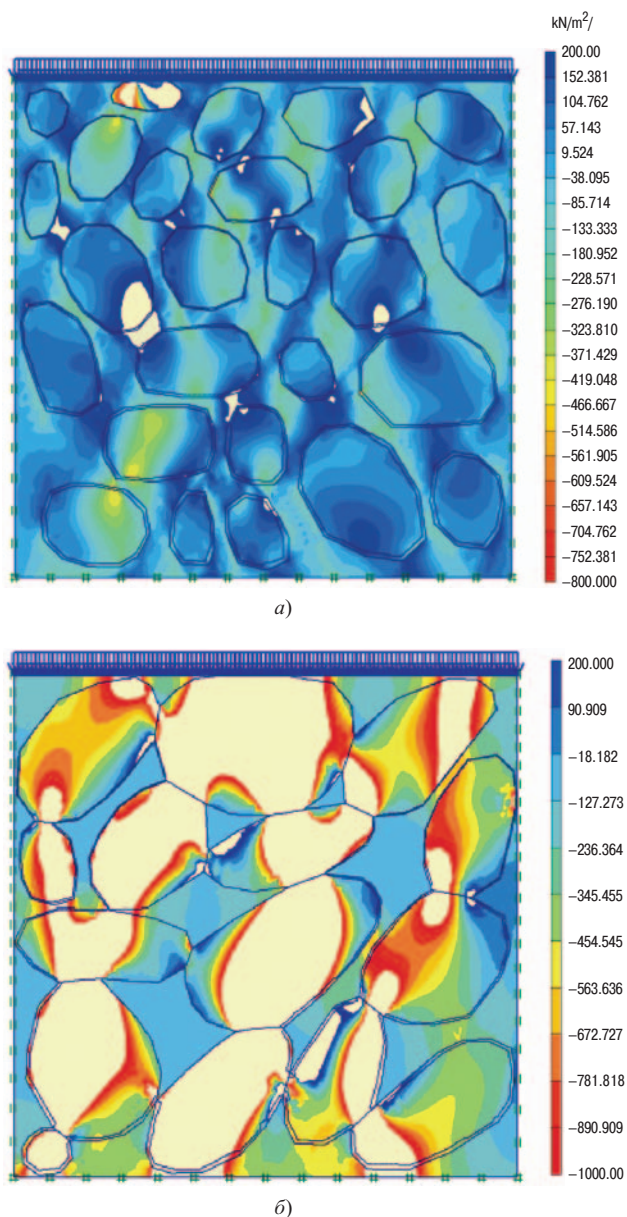


Рис. 2. Изополя totalных напряжений в неоднородном грунте в условиях компрессии в структурах типа *a* и типа *b* при среднем давлении 250 кН/м<sup>2</sup>

полностью защемленных в грунтовом скелете мельчайших частиц нарушает внутренние связи в грунтовом скелете, что влияет на деформационные свойства грунтов. При непрерывной фильтрации в течение суток в условиях высоких градиентов расход вынесенных твердых частиц  $V_{тв,ч}$  в песколовку составил 0,6 см<sup>3</sup>/ч, это соответствует уменьшению модуля деформации в 3 раза. Расчеты показали, что при длительном испытании на суффозию модуль деформации может уменьшаться до 10 раз.

Важно отметить, что если увеличение осадки связано с ростом нагрузки, то при суффозии увеличение осадок происходит при постоянной нагрузке и далее зависит от степени выноса частиц. Подробно результаты определения деформационных характеристик образцов грунта при фильтрации представлены в работе [1].



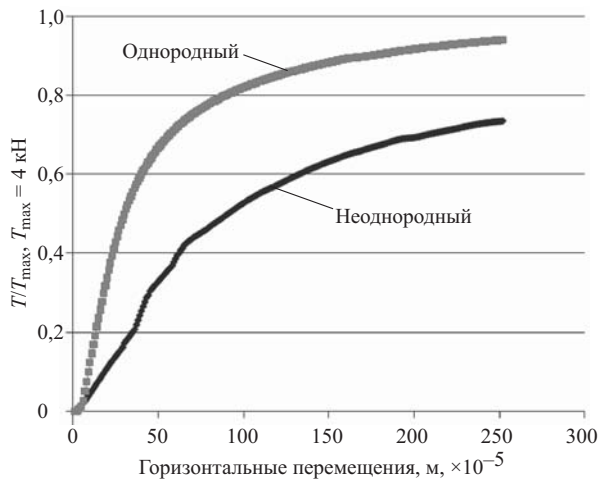


Рис. 3. Графики зависимости горизонтальных перемещений верха образца от горизонтального относительного усилия

В табл. 2 приводятся результаты определения деформационных характеристик песчаных грунтов при фильтрации с учетом суффозии по данным В. В. Анисимова (МГСУ, 2009 г.)

Анализ результатов экспериментов показал, что основными факторами, влияющими на возникновение механической суффозии, являются:

зерновой состав грунта, имеющий определенное число частиц в незащемленном (свободном) состоянии, чтобы частицы могли выноситься фильтрационными силами;

соотношение между размерами мельчайших частиц и порами между крупными частицами, позволяющее частицам свободно выноситься из скелета грунта;

значительные фильтрационные силы, определяемые градиентами напора, способные отрывать и перемещать частицы;

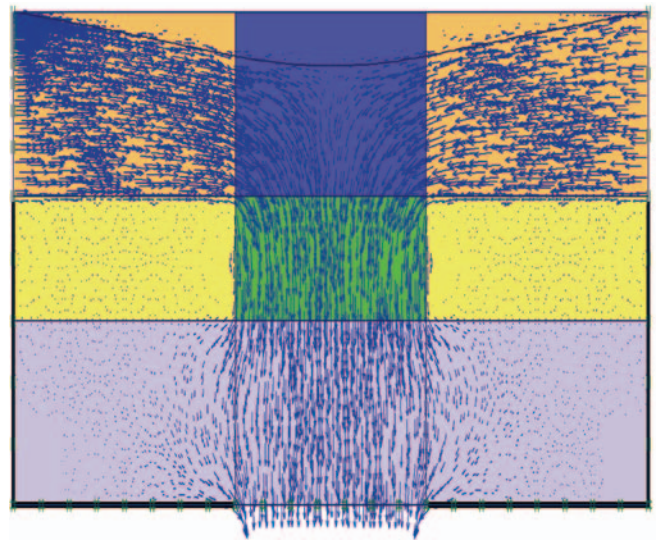


Рис. 4. Вектора направления фильтрации

неоднородность напряженного состояния в элементарном объеме грунта, которое также зависит от неоднородности зернового состава грунта и формируется под действием внешней нагрузки и фильтрационных сил.

Количественная оценка влияния перечисленных выше факторов на суффозию имеет важное теоретическое и практическое значение. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Влияние скорости движения воды в порах грунта. Условие, необходимое для перемещения механических частиц между порами крупных частиц, можно записать в виде

$$F_s > F, \quad (1)$$

Т а б л и ц а 2

Вертикальная нагрузка $P$ , кг/см <sup>2</sup>	Осадка $S_{ст}, S_{сф}$ мм	Относительная деформация статическая $\varepsilon_{ст} = S/h_{обр}$	Относительная деформация при суффозии $\varepsilon_{сф} = h_{обр} - h'/h_{обр}$	Напряжение $\Delta\sigma = P/A$ , кг/см <sup>2</sup>	Модуль деформации $E = \Delta\sigma h/\Delta\varepsilon_{ст}$ , МПа
Градиент $i = 0,8$ (суффозии нет)					
0,05	0,06	0,0005	-	0,099	15,8
0,15	0,08	0,00066	-	0,298	36,1
0,30	0,09	0,00075	-	0,597	63,7
0,45	0,1	0,00083	-	0,895	86,2
Градиент $i = 4$ (суффозия есть)					
0,05	0,5	0,0005	0,0042	0,099	1,8
0,15	0,7	0,00066	0,0058	0,298	4,1
0,30	0,8	0,00075	0,0066	0,597	7,2
0,45	1,0	0,00083	0,0083	0,895	8,6

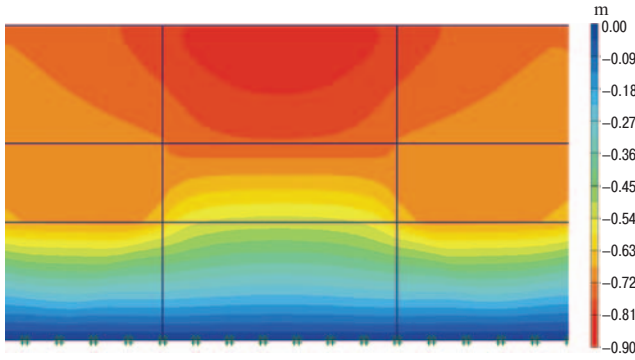


Рис. 5. Изополя суффозионной просадки свободной поверхности грунта

где  $F_s$  — выталкивающая сила на частицу песка;  $F$  — сила сопротивления частицы при движении ее со скоростью  $u$ .

Известно, что при движении частицы грунта в воде со скоростью  $u$  возникает сила сопротивления  $F$ , которая определяется по формуле Стокса

$$F = 3\pi d_1 \mu u, \quad (2)$$

где  $d_1$  — диаметр частицы;  $\mu$  — вязкость поровой воды;  $u$  — скорость движения частицы.

Средняя скорость движения воды в порах грунта определяется по формуле Пуазейля

$$\bar{u} = \frac{pd_2^2}{32\mu l}, \quad (3)$$

где  $p = \gamma_w h$  — давление в поровой воде;  $\gamma_w$  — удельный вес воды;  $h$  — напор воды;  $d_2$  и  $l$  — соответственно диаметр и длина рассматриваемого участка пор.

Подставляя (3) в (2) получаем силу сопротивления мелкой частицы диаметром  $d_1$  при ее движении в порах диаметром  $d_2 > d_1$  со средней скоростью  $u$ :

$$F_s = \frac{3\pi}{32} d_1 d_2^2 \gamma_w u. \quad (4)$$

Учитывая, что  $\gamma_w$  имеет размерность Н/см<sup>3</sup>, получаем силу сопротивления в Ньютонах —  $1 \text{ Н} = 10^5 \text{ г} \cdot \text{см}/\text{с}^2$ . Вертикальная сила, действующая на частицу во взвешенном состоянии, равна

$$F_g = \pi d_1^3 \frac{4}{3} (\gamma_s - \gamma_w). \quad (5)$$

Рассмотрим пример. При  $d_1 = 0,001 \text{ см}$ ,  $d_2 = 0,1 \text{ см}$ ,  $\gamma_w = 10^{-3} \text{ Н}/\text{см}^3$  получаем  $F_s \cong 0,3 \cdot 10^{-8} \text{ Н} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ грамм} \cdot \text{сила}$ .

Вес частицы равен  $2,6(10 - 9/23)3,14 \cdot 413 = 1,36 \cdot 10^{-9} \text{ г} < F_s$ . Следо-

вательно, выталкивающая сила  $F_s$  больше, чем масса частицы, т.е. удовлетворено необходимое условие  $F_s > F$  для движения частицы в порах между крупными частицами грунта.

Вертикальная составляющая сопротивления по формуле (4) зависит от направления движения потока:

$$F_\alpha = F_s \sin \alpha, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — угол наклона потока к горизонту.

В случае  $\alpha > 0$  выталкивающая вертикальная суммарная сила  $\Sigma F = F_\alpha + F_g$ , а в случае  $\alpha < 0$  суммарная сила  $\Sigma F = F_\alpha - F_g$ .

*Влияние зернового состава и соответствующей структуры грунта на суффозию.* В работе [2] отмечается, что соотношения между размерами мельчайших и крупных частиц, а также пор между крупными частицами должны быть такими, чтобы мелкие частицы не могли выноситься из скелета, образуемого крупными частицами. Если крупные частицы образуют несущий скелет грунта, а мелкие находятся в порах в свободном состоянии, то они могут свободно выноситься из скелета при условии, что их размеры меньше размеров пор несущего скелета. Для качественной оценки этого тезиса нами было проанализировано НДС грунта различного зернового состава.

В зависимости от соотношения мелких и крупных фракций в песчаном грунте могут формироваться самые разные структуры (рис. 1).

На рис. 1, а несущим каркасом песчаного грунта является совокупность мелких фракций, а крупные фракции, «плавающие» внутри него, вызывают неоднородность напряженного состояния в рассматриваемом объеме грунта, т.е. служат концентраторами напряженного состояния. На рис. 1, б несущим каркасом является совокупность крупных фракций, имеющих контакт между собой, а мелкие фракции заполняют поры между крупными фракциями и их влияние на напряженное состояние в структуре крупных фракций незначительное, особенно если они в рыхлом состоянии. Математическое моделирование напряженного состояния (НС) элементарного объема неоднородного песчаного грунта МКЭ, имеющего структуру типа а и б, показало, что как в первом, так и во втором случае НС существенно неоднородное. Это не согласуется с общепринятой концепцией механики грунтов об однородном НС в представительном элементарном объеме грунта [3]. Как и следовало ожидать, при прочих равных условиях (объемы и внешняя нагрузка равны) мелкие фракции в структуре типа а больше напряжены, чем в структуре типа б (рис. 2). Следовательно, во втором случае частицы мелкой фракции более подвижны под действием фильтрационного потока и могут легко выноситься между порами крупных фракций.

Неоднородность структуры грунта влияет также на деформационные свойства при сдвиге (перекашивании), что может привести к развитию горизонтальных перемещений фильтрующих массивов грунта в процессе суффозии. Математическое моделирование НДС неоднородного грунта в условиях сдвига показало, что касательные напряжения в неоднородном грунте распределяются неравномерно, а в однородном — равномерно. Из графиков зависимости горизонтального перемещения верха образца от усилия ( $T/T_{\max}$ ,  $T_{\max} = 4$  кН) видно, что крупнозернистые включения армируют грунт и повышают модуль сдвига грунта до трех раз при рассмотренном варианте (рис. 3).

*Влияние фильтрационных сил на НДС фильтрующих массивов и на суффозионно-неустойчивые грунты.* Напряженное состояние в неоднородном песчаном грунте формируется не только от внешней нагрузки и собственного веса, но и от действия фильтрационных объемных сил [2, 8], которые пропорциональны гидравлическому градиенту:

$$F_f = \gamma_w i(x, y, t), \quad (7)$$

где  $i(x, y, t)$  — гидравлический градиент в фильтрующем массиве, который зависит от координат  $x$ ,  $y$  и от времени  $t$ .

Это явление наблюдается в фильтрующих откосах и склонах, в основании и бортах глубоких котлованов, в водоносных горизонтах, контактирующих с карстующими породами, при этом фильтрационные силы имеют двойное воздействие. С одной стороны, они вызывают дополнительные напряжения в скелете грунта, а с другой — оказывают влияние на мельчайшие частицы, выталкивая их фильтрационным потоком. В этом случае могут встречаться условия, когда мелкие фракции не только перемещаются и выносятся наружу, но и оседают в локальных зонах (карманах) фильтрующего массива, когда  $i < i_{\text{кр}}$  (внутренняя суффозия).

В качестве примера рассмотрим НДС суффозионно-неустойчивого массива водонасыщенного грунта, подстилаемого карстующими породами. Под действием фильтрационных сил и собственного веса грунта в массиве формируется сложный фильтрационный поток (рис. 4), который после длительной суффозии приводит к формированию суффозионной просадки свободной поверхности грунта (рис. 5).

На основании приведенных выше результатов исследований механической суффозии в неоднородных песчаных грунтах можно дать количественную оценку влияния различных факторов, в том числе неоднородности состава и НДС грунта, на изменения физического состояния грунта (плотность, пористость) и на деформационные и прочностные свойства суффозионно-неустойчивых грун-

тов. Это необходимо для количественной оценки НДС фильтрующих массивов грунтов, служащих основанием, средой или материалом самых различных сооружений.

## Выводы

1. В результате лабораторных испытаний образцов песчаного грунта неоднородного состава установлено, что имеет место вынос твердых частиц фильтрационным потоком и вследствие этого в грунте развиваются дополнительные осадки и деформации образцов, сопровождающиеся общей деформацией скелета грунта, а также уменьшением модуля его деформации.

2. Изменения физико-механических свойств грунтов вследствие суффозии приводят к изменениям НДС грунтовых массивов и в конечном счете к дополнительным осадкам оснований сооружений.

3. Необходимо дать количественную оценку суффозной опасности массивов грунтов на основе лабораторных испытаний грунтов и математического моделирования НДС фильтрующих массивов грунтов.

4. Деформационные и прочностные свойства неоднородного песчаного грунта также существенно зависят от его зернового состава и структуры.

5. Одним из факторов, влияющих на механическую суффозию, является неоднородность напряженного состояния в песчаном грунте неоднородного зернового состава.

## Список литературы

1. Анисимов В. В., Тер-Мартirosян З. Г. Влияние механической суффозии на дополнительные осадки оснований фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. № 4.
2. Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин. — М.: АСВ, 2001.
3. Жиленков В. Н. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. — Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991.
4. Грунтоведение, — 6-е изд. Под ред. В. Т. Трофимова. — М.: МГУ, 2005.
5. Руководство по расчёту обратных фильтров плотин из грунтовых материалов / ВНИИВОДГЕО. М., 1982.
6. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З. НДС фильтрующих массивов грунта // Инженерная геология. 2008. № 4.
7. Тер-Мартirosян З. Г., Анисимов В. В., Тер-Мартirosян А. З. Механическая суффозия: Экспериментальные и теоретические основы // Инженерная геология. 2009. № 4.
8. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009.
9. СНиП 2.02.01.83\*. Основания зданий и сооружений. М., 1996.
10. СНиП 2.02-85. Основания гидротехнических сооружений. М., 1988.

## Науки о Земле: современный этап развития

Потапов А. Д., заведующий кафедрой инженерной геологии и геоэкологии, академик РАЕН, доктор техн. наук, кандидат геол.-мин. наук, профессор

Символическим фактом является совпадение нескольких важных дат в жизни нашего университета — это приближающийся 90-летний юбилей МИСИ-МГСУ, 80-летний юбилей факультета гидротехнического и специального строительства и самый важный для нашей кафедры инженерной геологии и геоэкологии — ее 75-летний юбилей. Во все годы деятельности университета наша кафедра всегда была в первых рядах как учебного процесса, так и научной работы. Достаточно вспомнить имена прежних заведующих кафедрой: ее основателя профессора, доктора геол.-мин. наук И. В. Попова, работавшего на ней с 1935 по 1946 г.; профессора, доктора геол.-мин. наук Н. Я. Денисова, заведовавшего кафедрой с 1946 по 1966 г.; профессора, доктора геол.-мин. наук Л. Д. Белого, руководившего кафедрой с 1966 по 1983 г.; профессора, кандидата техн. наук Г. А. Паушкина, работавшего на кафедре с 1983 по 1998 г. Каждый из этих больших ученых сделал исключительно много для инженерно-геологической науки. Профессор И. В. Попов — один из основателей инженерной геологии, профессор Н. Я. Денисов знаменит своим “принципом Денисова”, профессор Л. Д. Белый — создатель, по существу, системы инженерно-геологических изысканий для строительства в нашей стране, профессор Г. А. Паушкин активно содействовал сохранению инженерной геологии в очередной период реформирования высшей школы.

Кафедрой инженерной геологии и геоэкологии создана методическая база преподавания этих наук, которая до сих пор используется всеми строительными вузами нашей страны; написано несколько поколений учебников по инженерной геологии, огромное число учебных пособий и методических указаний для всех видов учебных занятий; обеспечено курсовое и дипломное проектирование; создана учебно-методическая и опытно-производственная база для реализуемой только в нашем университете учебной геологической практики. Это учебно-методическое обеспечение позволило укрепить позиции и доказать необходимость преподавания инженерной геологии для строительных специальностей, что подтверждено установленными тесными взаимосвязями со специальными дисциплинами. В научной области кафедрой выполнено большое число научно-исследовательских работ, например на таких объектах, как Кампыр-Рават; Рогунская, Ингурская, Рижская, Колымская ГЭС, гидроэлектростанции Волжского каскада; Приморская и Южно-Уральская ТЭС; Экибастузские ГРЭС; Каракумский канал; Ровенская, Калининская, Нововоронежская, Курская АЭС; плотина

Абу-Кебир в Сирии; на многих других объектах промышленного, энергетического, жилищного и социального строительства в Москве и Московской области. Количество экспертиз результатов инженерных изысканий исчисляется сотнями.

На кафедре защищено более 25 кандидатских и 5 докторских диссертаций. Многие из выпускников аспирантуры стали ведущими преподавателями кафедры, докторами наук, профессорами.

Ученые кафедры приняли участие в десятках международных научных конференций самого высокого уровня, доклады наших специалистов неизменно вызывали живой интерес.

Серьезным этапом в развитии кафедры стало ее переименование в кафедру инженерной геологии и геоэкологии, что явилось результатом активного развития научных исследований как в природоведческой составляющей наук о Земле, так и в области охраны окружающей среды. С этого времени кафедрой в учебный процесс вводится дисциплина “Экология”, для которой разработано полное учебно-методическое обеспечение, написаны учебник и учебное пособие, созданы методические указания для дипломного проектирования. Экологическая направленность кафедры позволила создать тесные связи с кафедрами, ведущими подготовку по природоохранным специальностям.

В настоящее время кафедра ведет преподавание более 20 дисциплин на всех специальностях нашего университета. На кафедре работают 29 преподавателей, из них 3 доктора наук, 21 кандидат наук, — это геологи, географы, биологи, геоэкологи, экологи. Число публикаций, кроме учебной литературы, составляет несколько сотен статей, восемь монографий.

Коротко остановимся на содержании и задачах наук о Земле — инженерной геологии, геоэкологии и геотехники.

*Инженерная геология* — одна из самых молодых наук геологического цикла, сформировавшаяся в первой трети XX столетия. Ее рождение было обусловлено колоссальным строительным бумом, который переживали все страны мира, где развивалась промышленность, транспорт и энергетика.

По определению академика Е. М. Сергеева, инженерная геология — это наука о рациональном использовании геологической среды и прежде всего при строительстве. За последние десятилетия существенным образом изменилось само строительство, его технологии, процесс проектирования, применяемые материалы, но необходимость в достоверной информации о геологической среде не только не потеряла своей актуальности, но еще

больше возросла. Это вызвано огромными объемами жилищного строительства, промышленных объектов, а также проблемами реконструкции ранее построенных сооружений, возведения высотных зданий и освоения на больших глубинах подземного пространства в городах. Особое место занимает освоение городских и других техногенно-загрязненных территорий, для которых требуется специфический “экологизированный” подход к проектно-изыскательскому и технологическому обеспечению. Известно, что никакое сооружение не является эссенциальным к природе, но желание создать такой объект имеет каждый инженер-строитель.

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение — научная специальность, объединяющая исследования инженерно-геологических и геокриологических образований, закономерности их формирования и изменения под воздействием природных и техногенных факторов, преимущественно в связи с хозяйственной деятельностью человека. Основной задачей инженерной геологии, мерзлотоведения и грунтоведения является изучение состава, структуры, теплового состояния, свойств и динамики массивов горных пород (грунтов) верхней части литосферы в ненарушенных и нарушенных человеком условиях и их влияния на строительство и эксплуатацию зданий и сооружений. В тесной связи с инженерно-геологическими исследованиями находятся гидрогеологические работы, без результатов которых невозможно адекватное природным условиям проектирование современных строительных объектов.

Анализ результатов инженерно-геологического обеспечения разнообразных строительных проектов отечественных и зарубежных объектов в различных географо-климатических, геологических и экологических условиях установил необходимость усиления внимания к изучению взаимодействия сооружений со средой их возведения и эксплуатации, к учету влияния условий среды в проектных и технологических решениях по строительным объектам, а также к учету все более проявляющегося негативного влияния строительства на среду возведения объекта и на среду обитания человека. В связи с этим все большее число запросов от строителей и проектировщиков требуют комплексной информации, в том числе об изменениях в геологической среде под воздействием строительства, о возможных негативных процессах и явлениях, спровоцированных строительством. Важным стало обеспечение строительства информацией о природной обстановке и прогнозе ее изменений на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта.

Перед строителями и проектировщиками возникла проблема обеспечения проектно-изыскательской документацией не только традиционных этапов строительства, но и новых, ранее такой документацией не обеспечивавшихся.

Вновь сформированные особенности обеспечения проектировщиков изыскательской документацией в рамках разработки проектов для всего жизненного цикла объекта потребовали определенного пересмотра принципов ведения комплексных изысканий для строительства. Задача это непростая и далека от окончательного решения.

Таким образом, выполнение в комплексном виде инженерных изысканий для строительства является главным принципом в научных исследованиях в области инженерной геологии. Необходим тщательный учет взаимодействия проектируемого сооружения с окружающей средой, а также разработка прогнозов развития неблагоприятных природных процессов во всех главных жизнеобеспечивающих геосферных оболочках на протяжении всего жизненного цикла объекта, естественно, с учетом масштабности рассматриваемого объекта и части окружающей среды, в которой он реализуется.

Из изложенного следует, что инженерная геология на современном этапе не только не изменила своего содержания, заложенного в определении академика Е. М. Сергеева, но и еще больше стала его отражать. По-существу, завершился определенный эволюционный этап в развитии инженерной геологии, она существенным образом экологизировалась. В этом смысле представления В. Т. Трофимова об экологической геологии [1] имеют серьезное основание, но с одним важным замечанием: при рассмотрении экологической геологии ее не стоит отделять от инженерной геологии, последняя, на наш взгляд, уже вполне сложившаяся экологическая наука.

*Геоэкология*, относящаяся к числу наук о Земле, является по своему предмету и методологии наукой экологического цикла. Это одна из самых молодых наук, формирование которой началось в последней трети XX столетия. В последние 30 лет она переживала различные трактовки своего содержания и направления научных исследований. Немалая негативная роль в различных, зачастую скороспелых, подходах к исследованиям и методологии геоэкологии принадлежит специалистам, которые расценили это научное направление как полностью принадлежащее к традиционным наукам о Земле. Да, это наука о Земле, но в данном случае Земля не геологический объект, а место обитания живого вещества, следовательно объект изучения экологии уже как науки биологического цикла.

*Геоэкология* — междисциплинарная наука, изучающая состав, структуру, закономерности функционирования и эволюции природных и антропогеннопреобразованных экосистем высокого уровня организации. Геоэкология представляет собой синергию биологических, геологических и технических наук, ставящим во главу угла разработку и реализацию методов, направленных на сохранение и улучшение жизни на Земле, на решение задач по

воспроизводству и охране комплекса природных ресурсов, среды обитания биоты и человека.

Объектом исследования геоэкологии являются геосферные оболочки Земли — литосфера, гидросфера, атмосфера; предметом исследования — закономерности и устойчивость человеческой деятельности по развитию жизни на Земле. На наш взгляд, в широком смысле и в перспективе развития предметом геоэкологии является среда обитания живого вещества, т.е. биотоп любого иерархического уровня, что позволяет сузить трактовку предмета геоэкологии и определить его следующим образом: геоэкология — это наука о составе, строении, свойствах, процессах и явлениях в жизнеобеспечивающих геосферных оболочках как среде обитания живого вещества [2, 3, 4].

Представляется, что в задачи геоэкологии должно входить изучение жизнеобеспечивающих геосферных оболочек, их ресурсов и изменения этих ресурсов под влиянием факторов окружающей среды. Такое представление о задачах геоэкологии корреспондирует с представлениями об этом академик В. И. Осипова [5, 6]. В этом случае цель геоэкологии будет полностью отвечать насущной проблеме человечества — преодолению глобального экологического кризиса и сохранению в будущем продуктивной природной среды, а значит, биосферы с человечеством как его составляющей.

Изложенные представления о тенденциях в развитии геоэкологии и инженерной геологии позволяют сделать заключение об исключительной близости этих наук и одновременно об их существенных различиях. Главное различие заключается в том, что инженерно-геологические исследования могут иметь предметом геологическую среду в том состоянии, в котором она должна быть изучена для целей строительства. Естественно, что при этом следует учитывать факт формирования особенностей геологической среды под воздействием техногенеза; однако методика, способы, приборная база и методы интерпретации данных исследований могут быть собственно инженерно-геологическими и совершенствоваться в этих рамках. Геоэкологические же исследования для целей строительства имеют более широкий перечень исследований, в связи с чем изучению подвергаются все жизнеобеспечивающие геосферные оболочки, а под конкретный строительный проект — все особенности биотопа и, конечно, биоценоза, хотя последние являются предметом экологических и/или биологических исследований. Инженерно-геологические условия биотопа в данном случае являются составляющей общей геоэкологической оценки биотопа при строительстве, и на первый взгляд инженерная геология приобретает подчиненное значение, но это далеко не так. У нее есть вполне определенный предмет исследования, который не может быть заменен исследованиями геоэкологического направ-

ления. Естественно, что инженерно-геологическая наука должна претерпеть определенные изменения, особенно при изучении современных геологических процессов, многие из которых инициируются или провоцируются деятельностью человека, прежде всего строительством. Близко к этому находится и традиционное грунтоведение, особенно когда необходимо исследовать техногенные грунты. При этом грунтоведческие методы должны применяться в комплексе с экологическими. Богатейший опыт инженерной геологии, накопленный при информационном обосновании реализованных бесчисленных строительных проектов, в большой степени может способствовать становлению и активному развитию геоэкологии. Собственно говоря, коэволюция этих наук может принести неоценимую пользу для реализации экологического строительства.

Теперь о *геотехнике*. Этот термин становится все более употребляемым в среде специалистов, занимающихся инженерными изысканиями. Уже появились некие доселе неизвестные инженерно-геотехнические изыскания. Кратко следует сказать, что со стандартных позиций определения науки у геотехники нет области и предмета исследований: они заняты инженерной геологией (генетическим грунтоведением) и механикой грунтов; нет собственной методологии: она заимствована у инженерной геологии и механики грунтов. Важнейший принцип отечественной школы грунтоведения, а именно генетический подход к определению условий формирования состава, строения, состояния и свойств грунтов, разделяемый не только инженерами-геологами и учеными в механике грунтов и скальных пород, при дальнейшем насаждении геотехники может привести к выхолащиванию научной основы изучения грунтов в рамках проведения инженерных изысканий для строительства. Но более важным является формализация научных исследований к “механистическому” подходу к изучению грунтов. Здесь не следует путать данного утверждения с принципами механики грунтов, которые далеко не механистические, а по-настоящему научные, исповедующие принципы механики как раздела физики. Вопросы инженерной геодинамики и геомеханики находятся вне поля зрения геотехники. В то же время причины и следствия развития геологических процессов и явлений представляют важнейший интерес для строителей.

Таким образом, геотехника не имеет своей области исследований, своего предмета и методологии и, более того, не может быть отнесена к естественнонаучным дисциплинам в связи с метафизичностью ее основных “научных” воззрений. Геотехнику следует рассматривать как отдельный, самостоятельный, важный сопутствующий раздел инженерной геологии, например, такой как техническая мелиорация. Предметом изучения геотехни-

ки следует определить свойства грунтов, подвергающихся воздействию технологий строительства и строительных конструкций, в целях прогноза изменения этих свойств и оценки возможного развития негативных геологических процессов в грунтовых толщах при строительстве и эксплуатации конкретных зданий, сооружений и инженерных коммуникаций с конкретным конструкторским решением [7 – 10].

В заключение отметим следующее. *Инженерная* геология становится все более современной наукой с большими информационными задачами и связана как с геолого-исторической обстановкой, так и с геодинамическими процессами в природной и техногенно-природной геологической среде. *Геоэкология* как новая, активно развивающаяся наука нацелена на оценку воздействий комплекса всех жизнеобеспечивающих геосферных оболочек на строительные объекты. *Геотехника* же призвана тщательно исследовать основания конкретных сооружений в сложных инженерно-геологических и геоэкологических условиях.

Все вышесказанное дает некоторое представление о состоянии ряда наук о Земле, которые ориентированы в большой степени на строительство. Может показаться, что развивается некий кризис этих наук, однако существенно возросшие требования со стороны строительства способствуют их совершенствованию. Представляется, что наиболее оптимальным будет их коэволюция, которая позволит получить наиболее достоверную информацию о площадке строительства в зависимости от конкретного строительного проекта.

Обеспечение проектирования и строительства объективной и достоверной информации — это задача инженерных изысканий, которые и переживают сейчас определенный кризис. Прежде всего он выражается в организационной неразберихе их осуществления. Это связано с медленно развивающейся системой СРО, а главное — с полным отсутствием легитимно действующих нормативных документов по их осуществлению. Да, намечена актуализация СНиПов и еще около 50 рекомендаций и ГОСТов, но к середине 2010 г. к этой работе никто еще и не приступал. Это, однако, вопрос решаемый в организационном плане. Более сложным является кадровое обеспечение инженерных изысканий. Пока это в основном выпускники вузов, готовящих инженеров-геологов и геодезистов. Основным недостатком этих специалистов не только с геоэкологической, но и с геотехнической стороны является слабое знание современного строительства, материалов, конструкций и технологий, а у выпускников строительных вузов — мизерное знание инженерной геологии, геодезии и экологии. Ситуация усугубится после полного перехода на “уровневую” систему высшего образования, когда бакалавры, строители вообще не будут владеть практиче-

скими знаниями в инженерной геологии, а инженеры-геологи не смогут отличить здание из монолитного железобетона от кирпичного, не говоря уже о высотных и подземных сооружениях. Тем не менее полученная бакалаврами-строителями или геологами теоретическая база позволяет развивать более высокую степень подготовки, а именно магистратуру. В связи с этим на кафедре инженерной геологии и геоэкологии ведется активная методическая проработка магистерской программы “Инженерные изыскания для строительства”. Примерный учебный план, построенный на базе ГОСа второго поколения, прошел обсуждение на совещании ведущих кафедр инженерной геологии, механики грунтов, оснований и фундаментов в 2008 г. в Санкт-Петербурге и получил общее одобрение. К настоящему времени магистерская программа перерабатывается в блочно-модульный вид для того, чтобы она могла быть доступна и для бакалавров по направлениям “Строительство” и “Науки о Земле”. Таким образом, в нашем университете сможет быть реализована уже в 2010 – 2011 г. магистерская программа “Инженерные изыскания для строительства” — это одна из важнейших задач кафедры, находящаяся в одном ряду с повышением качества преподавания базовых дисциплин и с развитием подготовки кадров высшей квалификации. Естественно, что кафедра инженерной геологии и геоэкологии, являясь структурным подразделением нашего университета, который приобрел статус Национального исследовательского университета, не останется в стороне от развития научных исследований, как фундаментальных и поисковых, так и научно-производственных, востребованных строительным комплексом г. Москвы и других регионов нашей страны.

## Список литературы

1. Трофимов В. Т. и др. Теория и методология экологической геологии. — М.: МГУ, 1997.
2. Потапов А. Д. Экология. — М.: Высшая школа, 2005.
3. Аняньев В. П., Потапов А. Д. Основы геологии, минералогии и петрографии. — М.: Высшая школа, 2008.
4. Аняньев В. П., Потапов А. Д. Инженерная геология. — М.: Высшая школа, 2008.
5. Осипов В. И. Геоэкология — междисциплинарная наука о экологических проблемах геосфер // Геоэкология. 1993. № 1.
6. Осипов В. И. Геологическая среда и будущее городов: проблемы и решения // Тр. Межд. конф. М., 2000.
7. Потапов А. Д. Вновь о геотехнике — есть ли причина для дискуссии // Инженерная геология. 2009. № 8.
8. Потапов А. Д., Кашиперюк П. И. О месте геотехники в реализации строительных проектов // Геотехника. 2009. № 1.
9. Потапов А. Д. Экологическое образование в высшей строительной школе России // Сб. трудов Европейской академии естественных наук. Ганновер, декабрь 2009.
10. Аняньев В. П., Потапов А. Д., Филькин Н. А. Специальная инженерная геология. — М.: Высшая школа, 2008.

# Влияние режима работы турбины и настроек системы автоматического регулирования на условия устойчивости и критическую площадь уравнительных резервуаров ГЭС

Муравьев О. А., доктор техн. наук (Московский государственный строительный университет)

Излагаются материалы работ некоторых авторов по исследованию влияния режимов работы турбин на устойчивость ГЭС с уравнительными резервуарами. Получен ряд новых результатов. Проведено сравнение аналитических зависимостей, принимаемых в расчетах устойчивости для ряда коэффициентов, с большим числом реальных данных.

**Ключевые слова:** турбина, режим работы, гидроэлектростанция, уравнительный резервуар, устойчивость, критическая площадь, линеаризованные уравнения.

В настоящее время с участием российских специалистов реализуется ряд проектов ГЭС с уравнительными резервуарами. Это Зеленчукская и Ирганайская ГЭС в России, Тери в Индии, Донгнай и Секаман во Вьетнаме, Нам-Конг в Лаосе. Намечается увеличение мощности построенных ГЭС Хоабинь и Яли (Вьетнам). Наличие на перечисленных ГЭС уравнительных резервуаров требует решения задачи устойчивости режимов. При длинных деривациях с постоянными инерции более 8–10 с устойчивость достигается за счет увеличения площади уравнительного резервуара сверх критической. Значение критической площади уравнительного резервуара может определяться с различной степенью детализации описания гидравлической системы, системы регулирования турбин, электрической нагрузки. Степень детализации определяет конструктивные запасы, вводимые для компенсации неучтенных факторов, а также для достижения необходимой степени затухания колебательных процессов.

Задачей статьи является систематизация материала, полученного разными авторами, по учету режимов работы турбин в расчетах устойчивости ГЭС с уравнительными резервуарами, а также анализ влияния на устойчивость параметров настройки системы регулирования.

При расчетах устойчивости “в малом” режимов ГЭС с верховым уравнительным резервуаром используется линеаризованная система уравнений, описывающая колебания жидких масс в системе “деривация — резервуар” [1]:

$$T_D \frac{dq_D}{dt} = -\Delta z + 2q_e h_W^{\max} \Delta q_D; \quad (1)$$

$$T_P \frac{dz}{dt} = \Delta q_D - \Delta q, \quad (2)$$

где  $T_D = \frac{L_D Q_n}{g H_n F_D}$ ,  $T_P = \frac{H_n F_P}{Q_n}$  — постоянные инерции соответственно деривации и уравнительного резервуара;  $\Delta z = \frac{\Delta Z}{H_n}$ ,  $\Delta q_D = \frac{\Delta Q_D}{Q_n}$ ,  $\Delta q = \frac{\Delta Q}{Q_n}$  — отклонения уровня, расхода деривации и расхода турбин от равновесных значений;  $q_e = \frac{Q_e}{Q_n}$  — относительный равновесный расход;  $h_W^{\max} = \frac{H_W^{\max}}{H_n} + \frac{H_{sk}^{\max}}{H_n}$  —

относительные потери напора в деривации и потери скоростного напора в резервуаре при номинальном расходе  $Q_n$ .

Уравнения (1) и (2) даны в относительных параметрах. В качестве базисных приняты суммарный максимальный расход турбин, связанных с резервуаром  $Q_n$ , и расчетный напор турбин  $H_n$ .

При классическом решении задачи устойчивости по Тома и Каламу-Гадену рассматриваются условия поддержания постоянной мощности ГЭС в некотором равновесном режиме работы при малых колебаниях уровня в резервуаре. Постоянство мощности при изменении напора обеспечивается за счет изменения расхода турбин. Принимаются идеальные условия регулирования, заключающиеся в абсолютно точном следовании расхода за изменениями напора.

Идеальные условия регулирования, записанные в отклонениях от равновесного режима, имеют вид

$$\Delta N = Q_e \Delta H + H_e \Delta Q = 0, \quad (3)$$

откуда получается связь между изменением напора и расхода турбины

$$\Delta q = -\frac{q_e}{h_e} \Delta h, \quad (4)$$



где  $Q_e H_e$ ,  $q_e$ ,  $h_e$  — соответственно абсолютные и относительные значения расхода и напора турбины в равновесном режиме, вблизи которого анализируются условия устойчивости;  $\Delta Q$  и  $\Delta H$  — малые отклонения от равновесного режима.

Выражение (3) отражает линейную зависимость приращения мощности турбины от приращений напора и расхода, что справедливо лишь при условии постоянства КПД турбины.

Учет изменения КПД турбины при отклонениях расхода и напора от равновесных значений приводит условия идеального регулирования мощности к виду

$$\Delta N = Q_e \eta_e \Delta H + H_e \eta_e \Delta Q + H_e Q_e \Delta \eta = 0. \quad (5)$$

Тогда выражение, связывающее приращение расхода и напора турбины, примет вид

$$\Delta q = -\frac{q_e}{h_e} \left( 1 + \frac{\Delta \bar{\eta}}{\Delta h} \right) \Delta h, \quad (6)$$

где отношение  $\frac{\Delta \bar{\eta}}{\Delta h} = \frac{H_e}{\eta_e} \frac{\Delta \eta}{\Delta H}$  учитывает изменение КПД от напора вдоль линий постоянной мощности на эксплуатационной характеристике турбины (рис. 1).

Если использовать (6) при выводе формулы критической площади, то выражение в скобках получается в виде сомножителя к площади резервуара, рассчитанной с допущениями Тома:

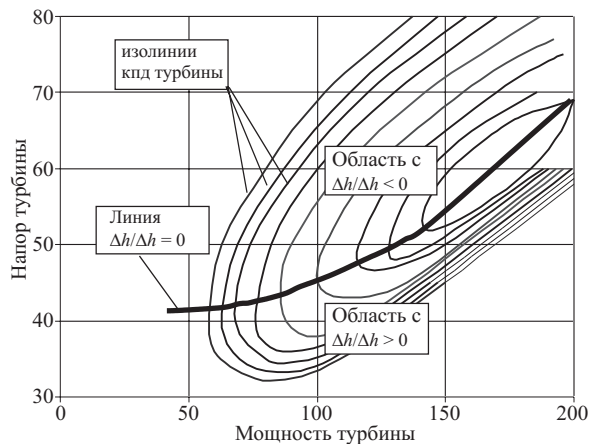
$$F_{кр} = F_{Th} \left( 1 + \frac{\Delta \bar{\eta}}{\Delta h} \right), \quad (7)$$

где  $F_{Th}$  — критическая площадь по формуле Тома [1].

Формула (7) получена Н. А. Картвелишвили [2]. Поправка  $\Delta \bar{\eta}/\Delta h$  может иметь как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от того, увеличивается или уменьшается КПД турбины при увеличении напора в условиях постоянства мощности.

На линии, проходящей через вертикальные касательные к изолиниям КПД турбины эксплуатационной характеристики (рис. 1), значение поправки равно нулю и справедлива формула (4), положенная в основу решения Тома.

Для области характеристики турбины, лежащей ниже линии  $\Delta \eta/\Delta h = 0$  (рис. 1), поправка по КПД увеличивает необходимую площадь резервуара. Анализ конкретных характеристик радиально-осевых турбин показал, что поправка растет с умень-



**Рис. 1.** Эксплуатационная напорно-мощностная характеристика турбины с областями положительных и отрицательных значений производной  $\frac{\Delta \eta}{\Delta h} = \frac{H_e}{\eta_e} \frac{\Delta \eta}{\Delta H}$ , учитывающей изменение

КПД от напора вдоль линий постоянной мощности

шением напора и ростом мощности, достигая на линии 95 %-ного ограничения значений 2 и более.

Наибольшие возможности для учета факторов, влияющих на критическую площадь резервуара, дает использование линеаризованных уравнений турбины.

При регулировании мощности в условиях постоянной частоты вращения расход РО турбины зависит от двух переменных: открытия направляющего аппарата и напора. Тогда приращение расхода турбины может быть определено из разложения функции двух переменных в ряд Тейлора. То же можно записать для вращающего момента турбины, пропорционального мощности в условиях постоянства частоты вращения:

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial Q}{\partial H} \Delta H; \quad (8)$$

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial M}{\partial H} \Delta H. \quad (9)$$

Принимая гипотезу идеального регулятора, приравниваем отклонение вращающего момента нулю  $\Delta M = 0$ . Исключая  $\Delta a$  из (8) и (9), получим уравнение для изменения расхода от напора при постоянной мощности

$$\Delta Q = \left( \frac{\partial Q}{\partial H} - \frac{\partial M / \partial H \partial Q / \partial a}{\partial M / \partial a} \right) \Delta H. \quad (10)$$

Производные в (10) могут быть выражены через параметры главной универсальной характеристики гидротурбины, т.е. через значения расхода, момента и частоты вращения, отвечающие напоры 1 м и

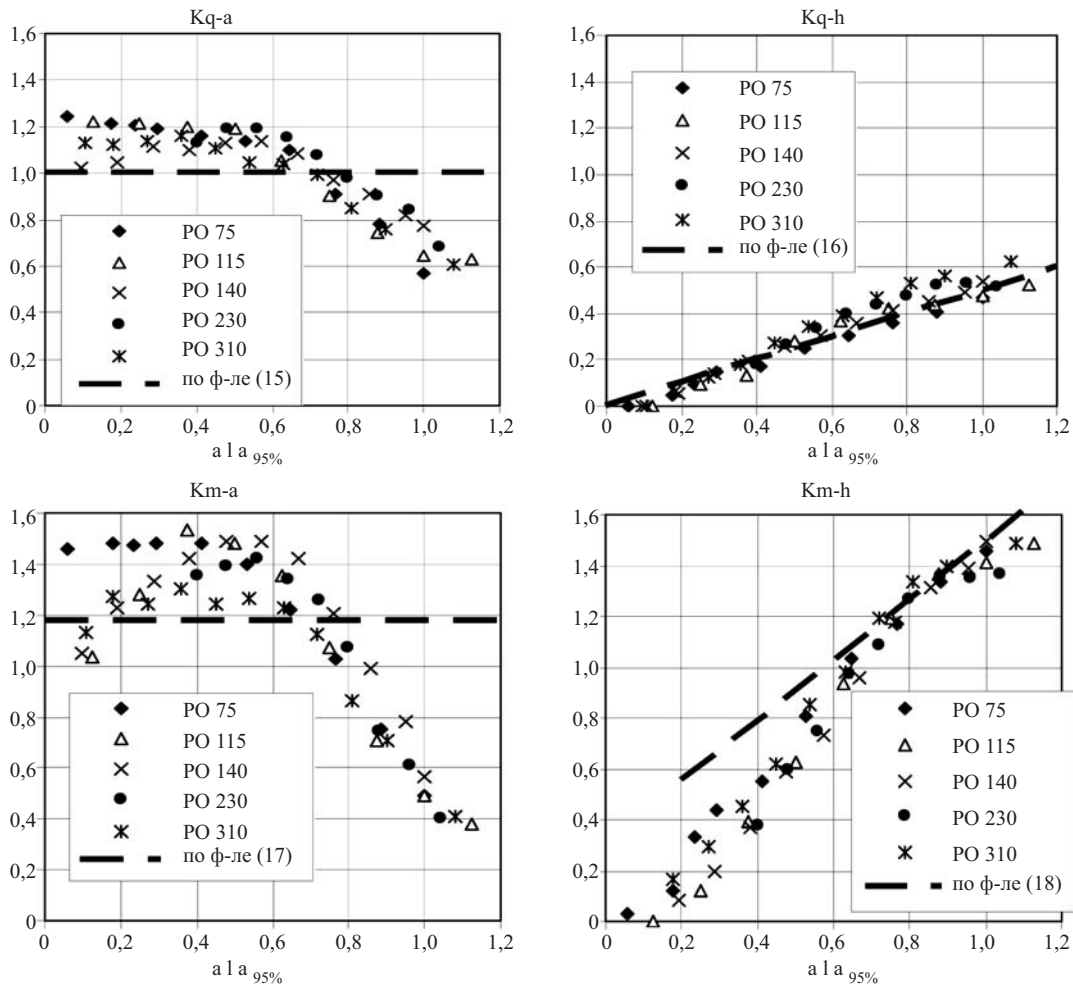


Рис. 2. Обобщенные данные по значениям производных, входящих в линеаризованные уравнения гидротурбины, в области характеристики оптимальной по приведенной частоте вращения и сопоставление с упрощенными аналитическими зависимостями (15) – (18) для их расчета

диаметру турбины 1 м. После перехода к относительным значениям получим производные в виде:

$$k_{q-h} = \frac{\partial q}{\partial h} = 0,5 \frac{1}{\sqrt{H_e}} \left( \frac{Q_{11e}}{Q_{11n}} - \frac{n_{11e}}{Q_{11n}} \frac{\partial Q_{11}}{\partial n_{11}} \right); \quad (11)$$

$$k_{m-h} = \frac{\partial m}{\partial h} = \left( \frac{M_{11e}}{M_{11n}} - 0,5 \frac{n_{11e}}{M_{11n}} \frac{\partial M_{11}}{\partial n_{11}} \right); \quad (12)$$

$$k_{q-\alpha} = \frac{\partial q}{\partial \alpha} = \sqrt{\frac{H_e}{H_n}} \frac{a_n}{Q_{11n}} \frac{\partial Q_{11}}{\partial a}; \quad (13)$$

$$k_{m-\alpha} = \frac{\partial m}{\partial \alpha} = \frac{H_e}{H_n} \frac{a_n}{M_{11n}} \frac{\partial M_{11}}{\partial a}, \quad (14)$$

где  $\alpha = a/a_n$  — относительное открытие направляющего аппарата; индексом  $e$  обозначены параметры текущего режима, вблизи которого анализируются условия устойчивости; индексом  $n$  — параметры номинального режима, используемые в расчетах

постоянных времени деривации и уравнительного резервуара в (1) и (2).

Выражения коэффициентов (11) – (14) получены Д. Н. Поповым [3] и Г. И. Кривченко [4] из геометрического рассмотрения характеристик турбины при  $H_e = H_n$ . Производные  $\frac{\partial q}{\partial \alpha}$ ,  $\frac{\partial q}{\partial h}$ ,  $\frac{\partial m}{\partial \alpha}$ ,  $\frac{\partial m}{\partial h}$  в [3, 4] определялись по упрощенным аналитическим выражениям:

$$\frac{\partial q}{\partial \alpha} = 1; \quad (15)$$

$$\frac{\partial q}{\partial h} = 0,5q_e; \quad (16)$$

$$\frac{\partial m}{\partial \alpha} = \frac{1}{1 - \alpha_{xx}}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial m}{\partial h} = \left( \frac{\alpha_e - \alpha_{xx}}{1 - \alpha_{xx}} - 0,5 \frac{\partial m_{11}}{\partial n_{11}} \right). \quad (18)$$

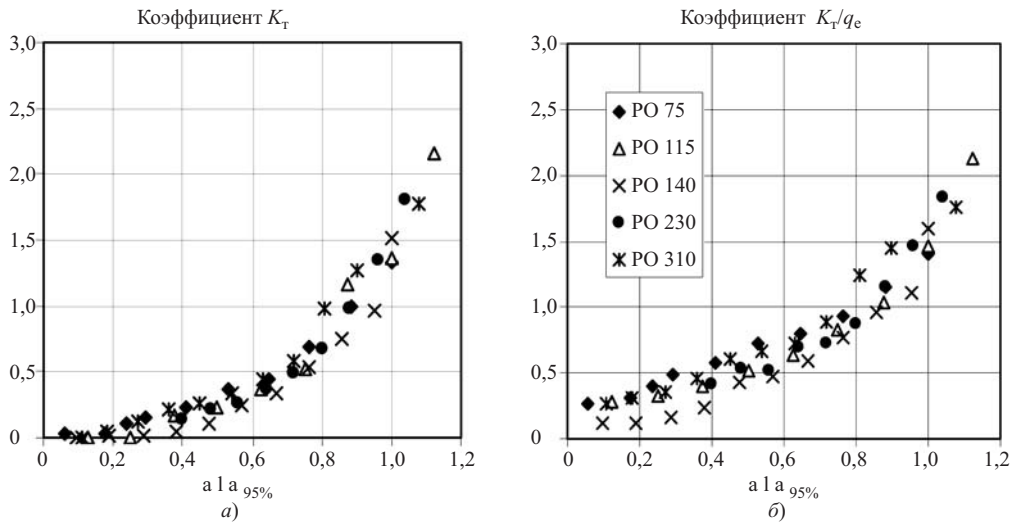


Рис. 3. Обобщенные данные по коэффициенту передачи турбины в области характеристики, оптимальной по приведенной частоте вращения, — а и по коэффициенту  $K_T/q_e$  к критической площади резервуара по формуле (23) — б

На рис. 2 показано, как расчет производных по аналитическим зависимостям (15)–(18) соотносится с их реальными значениями, определенными по характеристикам ряда РО турбин на напоры 75–310 м. Наибольшее расхождение наблюдается в производных  $\frac{\partial q}{\partial \alpha}$  и  $\frac{\partial m}{\partial \alpha}$ . Аналитические зависимости дают для них постоянные значения, тогда как реально эти производные значительно уменьшаются в области правее оптимума характеристики. На это обстоятельство указывалось в работе В. В. Берлина [5].

После подстановки значений производных (11)–(14) в (8) и (9) получаем линеаризованные уравнения гидротурбины при постоянной частоте вращения, которые полностью определяют ее свойства по изменению расхода и вращающего момента вблизи данной режимной точки.

Обозначая производные в (11)–(14) соответственно через  $k_{q-\alpha}$ ,  $k_{q-h}$ ,  $k_{m-\alpha}$  и  $k_{m-h}$ , получим выражение для изменения расхода турбины от напора при постоянной мощности

$$\Delta q = - \left( \frac{k_{q-\alpha} k_{m-h}}{k_{m-\alpha}} - k_{q-h} \right) \Delta h = -K_T \Delta h, \quad (19)$$

где  $K_T$  — коэффициент передачи турбины, характеризующий зависимость расхода турбины от напора при сохранении постоянной мощности.

Формула (19) полностью отражает свойства расходной и моментной характеристик гидротурбины в данной режимной точке через производные расхода и момента по открытию и приведенной частоте вращения.

На рис. 3 показано, как коэффициент передачи турбины  $K_T$  изменяется в зависимости от открытия

направляющего аппарата. На холостом ходу он составляет 0,05–0,1 в оптимуме характеристики 0,8–0,85; существенное увеличение, до 1,4–2, наблюдается при движении от оптимума к линии 95%-ного ограничения мощности.

Использование выражения (19) обеспечивает учет параметров расходной и моментной характеристик турбины в формуле для критической площади уравнительного резервуара. После исключения из (1), (2) и (19) переменных приходим к уравнению второго порядка, описывающему свободное движение системы. Его характеристическое уравнение имеет вид

$$T_D T_P a^2 + [2q_e h_W^{\max} T_P - K_T T_D] a - 2q_e h_W^{\max} K_T + 1 = 0. \quad (20)$$

Согласно критерия Гурвица, для уравнения второго порядка условием устойчивости является положительность коэффициентов характеристическо-

Значения коэффициента передачи  $K_T$  и отношения  $K_T/q_e$  в зависимости от режима работы турбины

Параметр	Режим работы турбины				
	при $H = H_p$				при $H = H_{\min}$
	холостого хода	оптимальный	номинальный	на линии 95% $N_{\max}$	на линии 95% $N_{\max}$
$q_e$	0,12	0,83	1,0	1,09	0,88
$h_e$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,65
$K_T$	0,02	0,85	1,6	2,22	1,76
$K_T/q_e$	0,2	1,0	1,6	2,04	2,01



Рис. 4. Области устойчивости систем автоматического регулирования активной мощности ГЭС с уравнильным резервуаром и частные решения для случаев идеального регулятора и без учета влияния характеристики турбины

го уравнения, откуда получаются два неравенства [6]:

$$T_P > \frac{K_T T_D}{2q_e h_W^{\max}}; \quad (21)$$

$$h_W^{\max} < \frac{1}{2q_e K_T}. \quad (22)$$

Если в (21) раскрыть значения постоянных времени, то получим выражение критической площади резервуара

$$F_{кр} = F_{Th} \frac{K_T}{q_e}, \quad (23)$$

где  $F_{Th}$  — критическая площадь по формуле Тома, рассчитанная для параметров номинального режима при расчетном напоре;  $K_T$  — безразмерный коэффициент, учитывающий параметры расходной и моментной характеристик турбины в данной режимной точке работы турбины;  $q_e$  — отношение расхода в данном режиме к расчетному.

Обобщенные данные по множителю  $K_T/q_e$  для РО турбин в диапазоне напоров 70 – 300 м даны на рис. 3, б.

В формуле (21) постоянные инерции, а также относительные потери рассчитаны по номинальному режиму и являются константами для данной

ГЭС. Таким образом, влияние режима работы турбины как по открытию, так и по напору учитывается через отношение  $K_T/q_e$ . Значения комплекса  $K_T/q_e$  для характерных режимов работы турбин, вплоть до линии 95 %-ного ограничения мощности универсальной характеристики, даны в таблице.

Из таблицы следует, что условия устойчивости ухудшаются с уменьшением напора и с приближением к линии 95 %-ного ограничения мощности. При расположении режимной точки на линии 95 %-ного ограничения критическая площадь резервуара может возрасти в 2 раза по сравнению с полученной по формуле Тома.

Дальнейшее уточнение расчета критической площади резервуара возможно за счет учета структуры и настроек группового регулятора активной мощности (ГРАМ), работающего в режиме поддержания постоянной мощности. Дифференциальное уравнение, описывающее работу группового регулятора пропорционально-интегрального типа, имеет вид

$$T_{II} \frac{d\alpha}{dt} = -m_e (k_{II} T_{II} \frac{dm}{dt} + \Delta m), \quad (24)$$

где  $T_{II}$  — постоянная времени интегрального звена;  $k_{II}$  — коэффициент усиления пропорционального звена;  $m_e = M_e/M_{ном}$  — отношение текущего момента к номинальному.

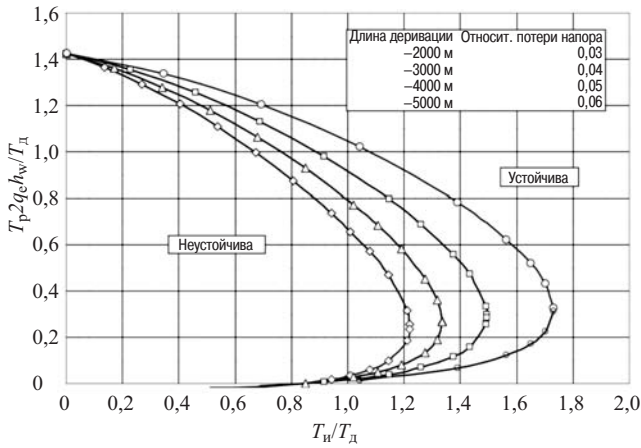


Рис. 5. Области устойчивости системы автоматического регулирования мощности ГЭС с уравнительным резервуаром при постоянном статическом напоре и различной длине деривации

Свободное движение замкнутой системы представляется линейным дифференциальным уравнением третьего порядка, полученным из уравнений (1) и (2), уравнений турбины (8) и (9), а также уравнения регулятора (24). Его характеристическое уравнение имеет вид

$$a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0. \quad (25)$$

Коэффициенты  $a_0 - a_3$  определены через постоянные времени деривации, резервуара и интегратора ГРАМ, а также потери напора и параметры режима турбины, определяемые через четыре производные по (11) – (14).

Для оценки устойчивости удобно использовать алгебраический критерий Гурвица

$$a_2 \cdot a_1 - a_3 \cdot a_0 > 0. \quad (26)$$

После перехода к безразмерным параметрам  $t_{И} = T_{И}/T_{Д}$ ,  $t_{р} = T_{р}/T_{Д}$  и разрешения (26) относительно  $t_{р}$  получим условие устойчивости системы в виде квадратного неравенства

$$a \cdot t_{р}^2 + b \cdot t_{р} + c > 0 \quad (27)$$

с коэффициентами

$$a = [t_{И} S_1 2q_e h_w^{\max} + k_{m-\alpha} m_e] k_{m-\alpha} m_e 2q_e h_w^{\max}$$

$$b = t_{И} [t_{И} S_1^2 2q_e h_w^{\max} + k_{m-\alpha} m_e S_2 4q_e h_w^{\max}] - m_e^2 k_{m-\alpha}^2 K_T$$

$$c = t_{И} S_2 [t_{И} S_1 - k_{m-\alpha} K_T m_e]. \quad (28)$$

Значения безразмерных параметров  $S_1$  и  $S_2$  в (28) определяются по формулам:

$$S_1 = 1 + k_{П} k_{m-\alpha} m_e;$$

$$S_2 = k_{q-h} - k_{П} k_{m-\alpha} K_T m_e. \quad (29)$$

Условие устойчивости в общем виде запишется в виде двух неравенств для постоянных уравнительного резервуара  $t_{р}$ :

$$t_{р} < t_{р1};$$

$$t_{р} > t_{р2}, \quad (30)$$

где  $t_{р1}$  и  $t_{р2}$  — корни квадратного уравнения  $a \cdot t_{р}^2 + b \cdot t_{р} + c = 0$ .

Если оба корня положительны, то для данных параметров напорной системы, режима работы турбины и настроек регулятора система будет устойчива не только при больших площадях уравнительного резервуара, но и при малых площадях.

Малые площади резервуара находятся в диапазоне от 0 до  $F_{р1} = t_{р1} \cdot \frac{L_{Д} \cdot Q_n^2}{g \cdot H_n^2 \cdot F_{Д}}$ , большие площади резервуара находятся в диапазоне от  $F_{р2} = t_{р2} \cdot \frac{L_{Д} \cdot Q_n^2}{g \cdot H_n^2 \cdot F_{Д}}$  до бесконечности.

Иллюстрация полученного решения дана на рис. 4. В общем случае область устойчивости ограничивается кривой линией. Частному случаю идеального регулятора (23) соответствует точка при  $T_{И} = 0$ . Частному случаю деривации без уравнительного резервуара соответствует точка при  $F_{р} = 0$  с  $T_{И} = T_{Д} \cdot K_T \cdot k_{m-\alpha} \cdot m_e$ , что совпадает с решением Г. И. Кривченко для напорного водовода без уравнительного резервуара [6].

Решение задачи о критической площади с учетом настроек системы регулирования позволило распространить область устойчивости вплоть до нулевой площади уравнительного резервуара.

На рис. 5 в качестве примера представлены границы областей устойчивости ГЭС в диапазоне длин деривации от 2000 до 5000 м при постоянном статическом напоре и значениях коэффициентов уравнения турбины, отвечающих линии 95 %-ного ограничения мощности при коэффициенте передачи турбины, равном 1,4. Решение (27) показывает, что с ростом длины деривации увеличивается доля потерь напора в статическом напоре ГЭС, тем самым улучшаются условия устойчивости. В этом отличие от частного случая идеального регулятора, в котором длина деривации не влияет на критиче-

скую площадь уравнильного резервуара, что убедительно доказано Г. И. Кривченко [6].

Для обеспечения устойчивой работы при любой площади резервуара нужно, чтобы постоянная интегрирования группового регулятора была больше чем  $1,8T_d$ , что укладывается в диапазон возможных настроек.

Таким образом, настройками центрального регулятора активной мощности можно:

компенсировать ухудшение условий устойчивости, обусловленное характеристикой турбины в области правее оптимума;

обеспечить устойчивость как при больших, так и при малых (на порядок меньших, чем по Тома) площадях уравнильного резервуара.

## Выводы

1. При выводе формулы для расчета критической площади уравнильного резервуара важным является учет характеристик турбины по изменению расхода и вращающего момента от открытия и напора. В формулах Тома и Калама-Гадена моментная характеристика турбины учитывается упрощенно.

2. Наибольшие возможности для учета факторов, влияющих на критическую площадь резервуара, дает использование линеаризованных уравнений турбины с коэффициентами, определяемыми по (11) – (14). С использованием линеаризованных уравнений гидротурбины получена уточненная формула для определения критической площади резервуара, в которой учитываются:

характеристики режима работы гидротурбины через отношение  $K_T/q_e$ ;

настройки звеньев группового регулятора активной мощности.

3. Коэффициент передачи турбины  $K_T$  показывает, что условия устойчивости ухудшаются с приближением к линии 95 %-ного ограничения мощности.

4. Совместный учет характеристик турбины, структуры и настроек системы регулирования позволяет наиболее точно оценить устойчивость режимов ГЭС с уравнильными резервуарами.

5. Настройками центрального регулятора активной мощности можно полностью компенсировать ухудшение условий устойчивости, обусловленное режимом работы турбины, и обеспечить устойчивость, как при больших, так и при малых площадях уравнильного резервуара.

## Список литературы

1. Берлин В. В., Муравьев О. А. Переходные процессы на ГЭС с уравнильными резервуарами. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Аронович Г. В., Картвелишвили Н. А., Любимцев Я. К. Гидравлический удар и уравнильные резервуары. — М.: Наука, 1968.
3. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. — М.: Машиностроение, 1987.
4. Кривченко Г. И. Автоматическое регулирование гидротурбин. — М.-Л.: Энергия, 1964.
5. Берлин В. В. Некоторые особенности динамических характеристик гидромашин // Сб. трудов МИСИ. 1978. № 171. С. 125 – 129.
6. Кривченко Г. И. О допустимости отступления от критерия Тома при назначении площади сечения уравнильных резервуаров // Гидротехническое строительство. 1988. № 7. С. 27 – 32.

## Судоходные каналы “Евразия” и “Волго-Дон 2”

Левачев С. Н., профессор, кандидат техн. наук (МГСУ),  
Языков С. В., главный специалист, кандидат техн. наук  
(ООО “Экспертный центр современных коммуникаций”),  
Есиновский В. А., главный инженер, кандидат техн. наук  
(ООО “ЭЦБ ГТС “Гидротехэкспертиза”),  
Мельник Г. В., начальник отдела (ОАО “Гипроречтранс”)

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 г. создание воднотранспортного соединения Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов в рамках развития системы внутренних водных путей России названо в качестве одной из задач формирования единого транспортного пространства России. Предполагается, что развитие воднотранспортного соединения между Азово-Черноморским и Каспийским бассейнами станет в 2016 – 2030 гг. одним из основных направлений развития транспортной инфраструктуры в Южном федеральном округе.

При обсуждении этого вопроса между руководством Российской Федерации и Казахстана Минтранс РФ предложил рассмотреть в качестве альтернативного варианта возможность использования второй нитки канала “Волго-Дон”, что специалистами с самого начала представлялось неверным.

Сопоставительное проектирование этих двух вариантов — “Евразия” и “Волго-Дон 2” — проводилось по заданию Евразийского банка развития в течение 2009 и 2010 гг. рядом проектных организаций во главе с генпроектировщиком ОАО “Институт Гидропроект”. Активное участие в проектных работах принимали преподаватели и выпускники факультета гидротехнического строительства МГСУ (МИСИ).

При выборе трассы воднотранспортного соединения (ВТС) определяющее значение имеют действующий Волго-Донской судоходный канал и естественная Кумо-Маньчская впадина между Каспийским и Азовским морями с существующими воднотранспортными и водохозяйственными гидротехническими сооружениями (рис. 1).

На основе анализа исходных данных и предварительных трассировок целесообразно детально рассмотреть по два варианта для каждого ВТС.

По “Волго-Дону 2” целесообразно рассмотреть северный и южный варианты прохождения трассы. Северный вариант предусматривает создание канала от Волгоградского водохранилища по частично выполненному ранее каналу от пос. Ерзовка до Дона (верховья Цимлянского водохранилища). По-

дача воды на шлюзование предусматривается из Волгоградского водохранилища. Южный вариант может быть протрассирован от затона Татьяна на р. Волге до Варваровского водохранилища и далее по существующему каналу, что является значительным преимуществом этой трассы.

По “Евразии” рассматривались вариант с использованием существующей Маньчской системы и выбранный окончательно вариант трассы, проходящей южнее этой системы с выходом в Азовское море. Концевые участки трассы канала также рассматривались в нескольких вариантах. Трасса принятого варианта проходит от Каспийского моря до Чограйского водохранилища, далее по этому водохранилищу, затем по суше южнее оз. Маньч-Гудило, Пролетарского и Веселовского водохранилищ, р. Дон с выходом в Азовское море в 4 км южнее г. Кагальника. Этот вариант позволяет не затрагивать крупные населенные пункты и избежать значительных нарушений природоохранных территорий.

При определении основных параметров ВТС и сооружений на них в качестве исходных данных были приняты два варианта объема перспективного грузопотока на 2030 г.: базовый — 48,8 млн. т. и оптимистический — 79,7 млн. т. Для базового варианта рассматривалось использование судов смешанного “река – море” плавания трех типов: танкеры, сухогрузы и контейнеровозы, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Трасса канала “Волго-Дон 2” проходит частично по трассе существующего Волго-Донского судоходного канала до Цимлянского водохранилища на р. Дон в районе г. Калача. Канал преодолевает подъем на 88,6 м от р. Волги до водораздельного бьефа — Варваровского водохранилища при помощи шлюзов № 1 – 9 и спускается к Цимлянскому водохранилищу на 43 м шлюзами № 10 – 13 и далее на 24 м шлюзами № 14 и 15 к Дону. Протяженность ВТС — 1324 км (без морских участков — 1065 км).

Вход в новую трассу предусматривается из р. Волги (затон Татьяна, в 37 км ниже существующего входа в ВДСК). Новый участок канала — обходной канал длиной 50 км пройдет в обход уплотненной застройки г. Волгограда. Объединение обход-

\* Гидротехническое строительство”. 2005. № 4.

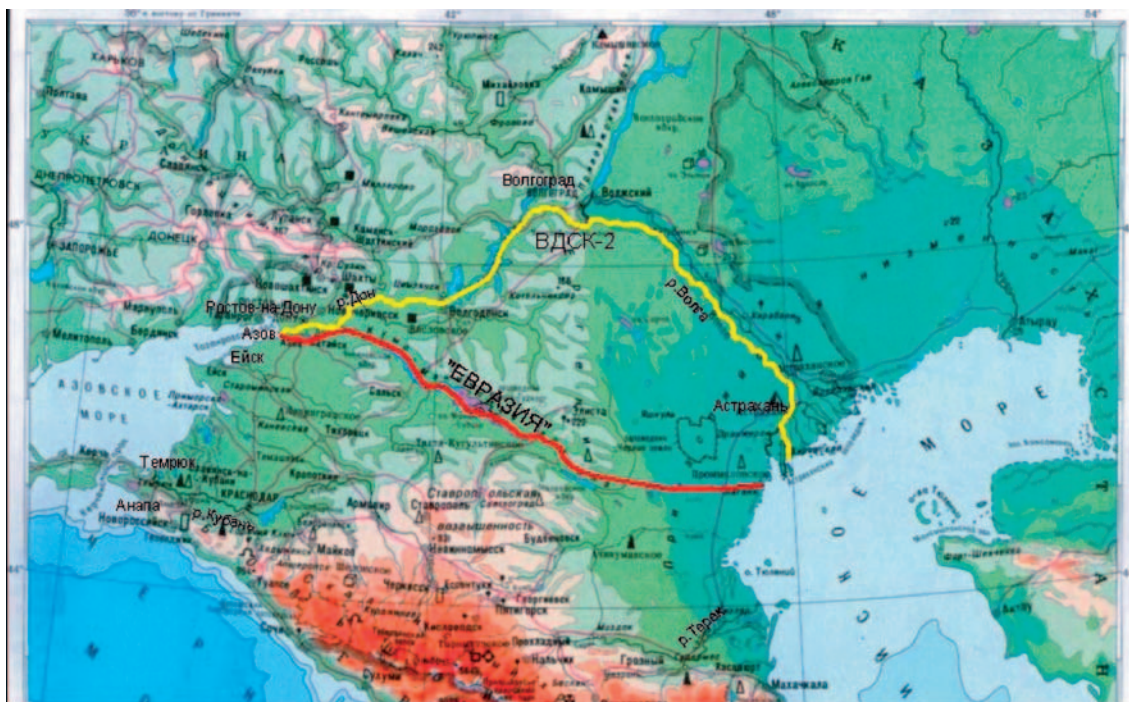


Рис. 1. Воднотранспортные соединения “Волго-Дон 2” и “Евразия”

ного канала с существующим ВДСК проектируется в водораздельном бьефе (Варваровское водохранилище). На этом участке запроектировано четыре двухниточных шлюза с напорами 22,2 м. В водораздельном бьефе предусматривается реконструкция судоходного канала для расчетных судов, а также реконструкция аварийно-ремонтных заграждений.

На донском склоне существующей трассы ВДСК располагаются 4 гидроузла с напорами 10,4 – 11,85 м. Перепад уровней воды между водораздельным бьефом и р. Дон (Цимлянское водохранилище) — 43,3 м. При реконструкции судоходной трассы предусматривается строительство четырех двухниточных шлюзов (дополнительно к существующим), а также увеличение габаритов каналов. Для обеспечения новых ниток водой для шлюзования намечено строительство трех новых насосных станций на расход 98,4 м<sup>3</sup>/с, (дополнительно к трем существующим, обеспечивающим ВДСК водой из Цимлянского водохранилища).

Цимлянский гидроузел имеет в составе сооружений два шлюза с общим напором 24,2 м. При ре-

конструкции намечено строительство двух дополнительных ниток судоходного шлюза с тем же напором. В верхнем бьефе из аванпорта предусматривается строительство подходного канала к новым ниткам, а в нижнем бьефе канал объединяется с существующим — расширенным и углубленным.

На Нижнем Дону в створах Николаевского и Константиновского гидроузлов предусматривается строительство дополнительных ниток полногабаритных шлюзов с напорами 5,4 и 3,7 м соответственно. Для обеспечения необходимых гарантированных глубин на р. Дон ниже Кочетовского гидроузла, который выводится из эксплуатации, намечается строительство Багаевского гидроузла с напором 5,6 м.

Трасса канала “Евразия” протяженностью 984 км (без морских участков — 755 км) включает два морских участка, участок по Чограйскому водохранилищу и основной участок, проходящий по искусственному руслу канала.

Водообеспечение канала “Евразия” предусматривается подачей воды из дельтовой протоки р.

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики расчетных судов

Вариант ВТС	Тип судна	Проект	Габаритный размер, м			Водоизмещение, т	Грузоподъемность, т
			длина	ширина	осадка		
Волго-Дон 2	Танкер	№ 19614	141,00	16,90	3,74	7920	5400
Евразия	Всех типов	Перспектива	164,50	18,50	5,00	10 200	9700



Волги (Бахтемир) в районе г. Оля водоподводящим каналом длиной 67 км до шлюза № 1 и далее насосными станциями при шлюзах № 1 – 5. При этом у шлюза № 5 вода подается в водораздельный бьеф (НПУ = 24 м) реконструируемого Чограйского гидроузла.

Вход в канал “Евразия” из Каспийского моря намечен в 15 км южнее г. Лагань. Через 38 км на канале устраивается гидроузел. Шлюзами № 1 – 5 обеспечивается сопряжение уровней: от минус 27 м Каспийского моря до 24 м Чограйского водохранилища.

Существующий Чограйский гидроузел с водохранилищем дополняется расположенным в его нижнем бьефе новым гидроузлом в составе плотины, шлюза № 5 и насосной станции. Реконструируемое Чограйское водохранилище образует водораздельный бьеф “Евразии”, аккумулируя воду для обеспечения шлюзования в периоды перебоев подачи воды из Бахтемира.

Шлюзами № 6 – 8 осуществляется сопряжение уровней Чограйского водохранилища (НПУ = 24 м) и Азовского моря с уровнем минус 1 м.

Габариты судовых ходов на канальных участках, форма поперечного сечения и геометрические характеристики каналов назначены с учетом двухстороннего движения судов и определены в соответствии с “Указаниями по проектированию судоходных каналов” (ВСН 3 – 70). Расчетные параметры каналов приведены в табл. 2 и на рис. 2.

В подводной части каналов предусмотрено крепление слоем щебня толщиной 0,5 м, а в зоне переменного уровня — каменной наброской средней толщиной слоя 0,6 м. На участках каналов, проходящих в глубоких выемках, нижние бермы шириной 6,5 м по обоим берегам используются под дороги пятой категории. Заложение “сухих” откосов принято равным 1:2,5 с устройством технологических берм шириной 1,5 м через каждые 6 м по высоте. Для канала “Евразия” в качестве противofильтрационной защиты предусмотрено устройство гидроизоляции из геомембраны на фильтрующих грунтах основания.

Габариты судоходных каналов на морских участках имеют существенно большие параметры, определенные в соответствии с требованиями “Норм технологического проектирования морских каналов” (РД 31.31.47-88) для двухстороннего движения расчетных судов (в западном направлении в грузу, в восточном — в балласте).

Принятые проектные габариты морских каналов для создания трасс обоих ВТС значительно превышают современные габариты используемых каналов, которые потребуются углублять и расширять, что частично предусмотрено подпрограммой “Внутренний водный транспорт” федеральной це-

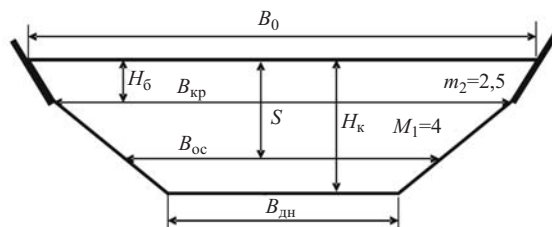


Рис. 2. Форма поперечного сечения канала

левой программы “Развитие транспортной системы России (2010 – 2015 г.)”.

В результате проектных проработок по ВТС “Волго-Дон 2” для обеспечения расчетного грузооборота по базовому варианту на каждом гидроузле приняты двухниточные шлюзы с габаритами камер 300 × 20 м и глубиной на пороге 5,5 м, с напорами, изменяющимися от 3,2 до 22,2 м. В каждой камере размещается два расчетных судна, устанавливаемые в кильватер. При этом грузопропускная способность шлюзов, определяемая в предположении, что шлюзование будет осуществляться из расчета 25 % при одностороннем шлюзовании и 75 % при двустороннем, несколько превышает величину расчетного грузопотока. Продолжительность навигации принята равной 233 суткам.

Все конструкции судоходных шлюзов запроектированы из монолитного железобетона, головы и камеры представляют собой конструкции докового типа – с неразрезным днищем.

Наиболее сложным сооружением в этом проекте является Багаевский гидроузел, расположенный в 58 км ниже Кочетовского гидроузла, в состав которого входят водосливная плотина, водосброс-регулятор, судоходный шлюз (три нитки), рыбопропускной шлюз (две нитки), рыбоходно-нерестовой канал, земляная плотина и автодорожный мостовой переход через гидроузел и пойму.

Строительство Багаевского гидроузла позволит обеспечить необходимые глубины (4,0 – 4,3 м) на участке реки до Кочетовского гидроузла.

Все судоходные шлюзы на ВТС “Евразия” приняты одниточными, с габаритами камер 350 × 20 м и глубиной на пороге 6,5 м при напорах 10 – 11 м, кроме шлюза № 6 с напором 4,0 м, который работает как шлюз-регулятор. В каждой камере размещается два расчетных судна, устанавливаемые в кильватер.

При тех же расчетных условиях с учетом продолжительности навигации 280 суток грузопропускная способность шлюзов составляет 43,5 млн. т в каждом направлении, что несколько превышает величину перспективного базового грузопотока.

Судоходные шлюзы запроектированы из монолитного железобетона, головы и камеры представляют собой конструкции докового типа с неразрез-

ным днищем. Рассмотрен также вариант конструкции шлюзов со стенами из заанкерованного металлического шпунта, установленными на железобетонную плиту днища.

Помимо основных судоходных сооружений и насосных станций на ВТС запроектированы водоспуски, аварийно-ремонтные заграждения, паромные переправы, водопропускные сооружения. Предусмотрено строительство мостов, туннелей, переходов для диких животных и т.п.

На данном этапе сравнительной оценки сопоставляемых вариантов ВТС необходимо остановиться на основных вопросах: грузопропускной способности, водообеспечении, условиях судоходства, стоимости строительства и экологических проблемах.

Рассчитанная в соответствии со СНиП грузопропускная способность по обоим вариантам формально оказалась примерно одинаковой и равной базовому значению перспективного грузооборота. Эта теоретически подсчитанная грузопропускная способность для варианта ВТС “Волго-Дон 2” является предельно возможной. Однако реализация её в процессе эксплуатации представляется маловероятной по следующим причинам:

на Нижнем Дону существует 37 затруднительных мест, где на протяженных участках возможно только одностороннее движение, причем радиусы поворота на этих участках меньше требуемых нормативными документами (что недопустимо для международного транзита). При этом предполагается на гидроузлах разместить три нитки шлюзов (четыре — на Константиновском гидроузле). В этих условиях при определении пропускной способности трех ниток шлюзов необходимо существенно увеличить значение коэффициента неравномерности подхода судов, по экспертной оценке — до 1,5 – 1,7 (по сравнению с нормативным 1,3), что уменьшает грузопропускную способность ВТС на 15 – 20 %. К тому же принятый в проектных проработках запас под килем в 26 см фактически исключает возможность безаварийной эксплуатации ВТС;

если на затруднительных участках проведение необходимых дноуглубительных и выправительных работ невозможно по экологическим сообра-

жениям, как это утверждают специалисты, то надо переходить на меньшие суда (для которых существующие условия судоходства допустимы) и соответственно уменьшать грузопропускную способность ВТС “Волго-Дон 2”.

Условия эксплуатации ВТС “Евразия” при искусственном сравнительно прямолинейном русле с запасами глубин под килем расчетного судна в 1,5 м не вызывают сомнений в обеспечении грузооборота по базовому варианту.

Оба варианта ВТС для обеспечения шлюзования судов питаются водой с помощью машинной подачи её на водораздельный бьеф. Объемы подаваемой воды зависят от параметров шлюзовых камер, напора на шлюзы, количества шлюзований в сутки и продолжительности навигации. Кроме шлюзования учитывается расход воды на испарение, фильтрацию и первоначальное заполнение ложа каналов (табл. 3).

Питание канала “Волго-Дон 2” водой осуществляется из Цимлянского водохранилища. Подача воды непрерывна в течение всего навигационного периода. Насосные станции, обеспечивающие водой существующий канал, подлежат реконструкции.

Питание канала “Евразия” водой осуществляется из дельты р. Волги. Вода двумя насосными станциями по водоподводящему каналу подводится к нижнему бьефу шлюза № 1 и перекачивается в его верхний бьеф. По судоходному каналу вода подводится к шлюзу № 2, перекачивается насосами в верхний бьеф и далее до водораздельного Чограйского водохранилища.

С 16 мая по 31 августа забор воды из р. Волги по требованиям рыбоохраны не производится и шлюзование происходит за счет запаса воды в Чограйском водохранилище. С 1 сентября по 10 декабря и с 1 марта по 15 мая для осуществления судопропуска и наполнения водохранилища с восстановлением к 15 мая уровня 24,00 м вода подается насосными станциями с расходом до 75 м<sup>3</sup>/с (при потребности в воде 73 м<sup>3</sup>/с).

Анализ условий гидравлического питания ВТС позволяет сделать выводы, существенно влияющие на сопоставительную оценку обоих вариантов:

при безвозвратном отборе дополнительного объема воды для нужд шлюзования на канале “Волго-Дон 2” (1,3 км<sup>3</sup>) попуски из Цимлянского гидроузла сокращаются с 410 – 340 м<sup>3</sup>/с до 170 – 100 м<sup>3</sup>/с, что недопустимо по ряду эксплуатационных, экологических и социально-экономических условий на Нижнем Дону. Альтернативным решением является подача воды из р. Волги, что потребует сложных согласований с экологами и в несколько раз увеличит расходы на обеспечение водой канала “Волго-Дон 2”;

Т а б л и ц а 2

Геометрические характеристики каналов

Вариант ВТС	Параметры канала, м						
	<i>S</i>	<i>H<sub>к</sub></i>	<i>H<sub>б</sub></i>	<i>B<sub>дн</sub></i>	<i>B<sub>ос</sub></i>	<i>B<sub>кр</sub></i>	<i>B<sub>0</sub></i>
Волго-Дон 2	3,8	5,5	2,0	60,0	73,6	88,0	98,0
Евразия	5,0	6,5	2,0	48,0	60,0	84,0	94,0

предлагаемый институтом “Севкавгипроводхоз” вариант забора воды из р. Волги (Оля) для питания канала “Евразия” включает искусственный “безуклонный” открытый канал длиной около 67 км, ширина которого поверху соизмерима с шириной судоходного канала. Такое решение представляется неоправданно сложным и дорогим. Целесообразно более внимательно рассмотреть вариант подачи воды из устьевой части р. Волги по опресненной зоне Северного Каспия до входного участка канала “Евразия”, в котором в период эксплуатации канала всегда будет пресная вода, сбрасываемая при шлюзовании судов. Эта же вода может перекачиваться в верхний бьеф шлюза в период всей навигации, практически без ущерба для рыбного хозяйства, что существенно снизит затраты на реконструкцию Чограйского водохранилища.

Общая сопоставительная оценка водообеспеченности сравниваемых вариантов ВТС склоняется в пользу канала “Евразия”, учитывая меньшую высоту подъема воды на водораздел и практически неограниченные возможности её подачи из Северного Каспия.

В результате сопоставления условий судоходства на трассах сравниваемых ВТС можно сделать вывод о том, что условия плавания по морским и каналным участкам, а также по водохранилищам примерно одинаковы для обоих вариантов. Наиболее сложные условия ожидают судоводителей на речных участках трассы ВТС “Волго-Дон 2” (Нижний Дон и Нижняя Волга), что связано с принятыми малыми запасами глубин — 26 см, с узостью и извилистостью судового хода на большом количестве протяженных участков. Следовательно, степень безопасности транзитных перевозок по этому пути будет меньше, чем по “Евразии”.

Наибольшие трудности возникают при сопоставительной оценке вариантов ВТС с экономических позиций. Основные проблемы связаны с методикой оценки (по объектам-аналогам, по объемам работ и т.д.) и сложностью подсчета затрат по многочисленным составляющим общей стоимости строительства. Отметим, что при подсчете общих затрат кроме основных затрат на строительство и эксплуатацию судоходных сооружений (шлюзы, каналы, насосные станции, плотины) были учтены: затраты на строительство вспомогательных гидротехнических сооружений (водосбросные и водопропускные сооружения, аварийно-ремонтные заграждения); затраты на создание воднотранспортной инфраструктуры (навигационная обстановка, технический флот и транспорт, связь, сигнализация, энергоснабжение, охрана основных и вспомогательных гидросооружений, диспетчерская служба, управление и административные службы, включая административные и жилые здания); затраты на ре-

конструкцию, перенос и строительство объектов инфраструктуры других видов транспорта, коммуникаций; затраты на компенсационные мероприятия по снижению отрицательного воздействия воднотранспортных соединений на экосистему, по переселению населения и отчуждению земель; затраты на создание строительной-производственной базы строительства вариантов воднотранспортных соединений.

Учитывая различие методик и точность расчетов основных затрат на данной стадии работ имеет смысл говорить не об абсолютных величинах сводных затрат, а о возможном диапазоне затрат, связанных со строительством воднотранспортного соединения. На базовый вариант грузооборота эти затраты составляют для варианта “Волго-Дон 2” 548 – 764 млрд. руб., для варианта “Евразия” — 489 – 554 млрд. руб.

В соответствии с техническим заданием банка были проведены также расчеты затрат на строительство ВТС для оптимистического варианта грузооборота. Ориентировочно эти затраты составляют для варианта “Волго-Дон 2” 780 – 1014 млрд. руб., для варианта “Евразия” — 540 – 666 млрд. руб.

Большое внимание уделено экологическим и социально-экономическим вопросам, которыми занимались ЮНЦ РАН и СОПС. При выборе варианта реализации воднотранспортного соединения Каспийского моря и Азово-Черноморского бассейна на основе сравнительной оценки природно-ресурсных, экономических, социальных аспектов осуществления проектов предпочтение отдано варианту строительства канала “Евразия” по следующим соображениям:

реализация варианта “Евразия” окажет сравнительно большее положительное воздействие на экономическое развитие регионов (Республика Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область);

в условиях реализации варианта “Евразия” прогнозируется более существенное сглаживание социальных различий (и экономических аспектов) в уровне жизни населения регионов.

Т а б л и ц а 3

**Потребность в воде, необходимой для создания ВТС**

Вариант ВТС	Объем воды на шлюзование, км <sup>3</sup>	Расход, м <sup>3</sup> /с	Объем воды на заполнение, км <sup>3</sup>	Потери, м <sup>3</sup> /с	Источник
Волго-Дон 2	1,98	98,4	0,043	0	Цимлянское водохранилище
Евразия	0,84	34,64	1,14	8,6	р. Волга

Любое строительство и нарушение естественных природных условий потенциально может привести к изменению условий и качества жизни животных и растений, обитающих в зоне обоих воднотранспортных соединений. Для снижения отрицательного воздействия воднотранспортных соединений на водные и наземные экосистемы необходимо предусмотреть следующие компенсационные мероприятия и затраты:

проведение мониторинговых исследований по оценке изменений численности (плотности) и местообитания редких видов растений и животных;

компенсационные мероприятия в связи с ущербом рыбным запасам при дноуглубительных работах, в том числе создание УЗВ для выращивания ценных пород рыб;

создание спусков к воде для мигрирующих животных (сайгак), установку заградительных сооружений в определенных местах, создание питомников для разведения сайгака на территории, находящейся южнее канала;

пересадку редких видов растений, произрастающих в зоне строительства, в сходные биотопы, а в некоторых случаях корректировку ширины полосы отчуждения;

создание лесозаградительных полос вдоль канала.

В результате проведенных сопоставительных оценок подтвердилось первоначальное мнение специалистов о том, что рассматриваемые варианты воднотранспортных соединений не являются альтернативными. “Евразия” предназначена для транзитных грузопотоков между странами Азии и Европейского Союза, а водный путь через Волго-Донской судоходный канал ориентирован, как это было при его создании, на грузопотоки между центральными районами России и Черноморским бассейном. В связи с многолетней эксплуатацией, необходимость реконструкции его основных гидротехнических сооружений является очевидной. Рассмотренный вариант реконструкции водного пути по Дону с затоплением только что построенной второй нитки Кочетовского гидроузла представляется сомнительным.

### **Вывод**

Сравнительный анализ приведенных материалов позволяет сделать вывод в пользу воднотранспортного соединения “Евразия”, которое позволит России расширить экспорт международных транспортных услуг в государственных экономических и геополитических интересах.

## **Приоритетные направления исследований в области защиты городских водных объектов**

Пупырев Е. И., доктор техн. наук, профессор,  
Волшаник В. В., доктор техн. наук, профессор,  
Платонова О. А., кандидат хим. наук,  
Суйкова Н. В., кандидат техн. наук,  
Голубкина Е. П., инженер (кафедра УПТС)

При уплотнении городской застройки интенсифицируется использование водного фонда для хозяйственно-питьевых и культурно-бытовых нужд промышленности, энергетики и т.д. Реки и водоемы на территории города загрязняются и утрачивают основные свойства природных водных объектов (естественные условия формирования, питания и самоочищения) и переходят в разряд природно-техногенных водохозяйственных объектов [1].

Загрязнение городских водных объектов может происходить из различных источников, но наибольший урон наносит поступление поверхностного стока с территории, поскольку этот вид сточных вод чрезвычайно нестабилен по расходу и составу. Поверхностный сток с городских территорий вно-

сит значительное количество загрязняющих веществ в водные объекты, вызывает их загрязнение и заиление. Донные отложения, формирующиеся в водоемах в дождливую погоду, нарушают жизнедеятельность микроорганизмов и отрицательно сказывается на биоценозе и процессах самоочищения [2]. Анализ накопленного опыта позволил сформулировать в качестве приоритетных два метода защиты водоемов: инфильтрация поверхностного стока перед сбросом в водные объекты и строительство прудов или каскадов прудов-отстойников, повышение их самоочищающей способности.

Инфильтрация поверхностного стока применяется, в частности, в столице Австрии — Вене, система очистки сточных вод которой признана луч-

шей в Европе. Ранее дождевую воду в Вене отводили централизованно, а сейчас городскими властями поставлена задача данный тип сточных вод в максимально возможном объеме оставлять в естественном круговороте, аккумулируя, используя или инфильтруя ее прямо на месте. Такая концепция вошла и в “Правила строительства в г. Вене”: “Запрещается спускать дождевую воду при наличии необходимых условий для инфильтрации”. К такой же концепции управления поверхностным стоком склоняются и специалисты из США, как к наиболее экономичной и эффективной [3]. Ученые Технического университета штата Вирджиния начали исследование инфильтрационной способности корней деревьев. Первые результаты показали, что корни некоторых деревьев могут глубоко проникать сквозь уплотненную подпочву и тем самым повышать скорость инфильтрации. В одном исследовании корни бархатного дуба и красного клена проникали сквозь тяжелый суглинок, уплотненный до  $1,6 \text{ г/см}^3$ , повышая скорость инфильтрации в среднем на 153 % [4].

Исследование различных методов инфильтрации и водопоглощающих устройств необходимо провести и в нашей стране, особенно в районах с благоприятными гидрогеологическими условиями. Но опыт зарубежных стран показывает, что даже на территориях с малой инфильтрационной способностью поверхности вполне возможно применение инфильтрации поверхностного стока с помощью специальных методов (трубная и ригольная инфильтрация) [5]. Особенно это актуально для городов из-за дефицита свободных площадей для строительства локальных и территориальных очистных сооружений и прудов.

В области усиления самоочищающей способности водоема перспективны исследования природных механизмов очищения воды. В частности биоинженерные технологии представляют собой способ улучшения качества воды путем создания гидравлической системы аэрации и формирования природной экосистемы водоема с помощью заселяемых в него гидробионтов [6]. Биоинженерные методы очистки загрязненных стоков включают в себя создание гидрботанических площадок и биоплато. Биоинженерные технологии позволяют не только восстановить качество воды в водоеме, но и очистить поступающие загрязненные сточные воды. Такие технологии предполагают создание гидравлической системы аэрации и формирование природной экосистемы водоема с помощью заселяемых в него гидробионтов, макрофитов [6].

В области биоинженерных технологий научный интерес представляет изучение поглотительной способности макрофитов в условия антропогенного воздействия, особенно в вопросе поглощения тя-

желых металлов. У каждого вида водного растения существует определенный предел поглощения загрязняющих элементов, превышение которого может привести к изменению растений, вторичному загрязнению водного объекта, гибели [7].

Оптимизация системы искусственной аэрации в водоеме — тоже достаточно эффективный способ интенсификации процессов самоочищения. Система гидравлической аэрации предполагает создание таких устройств, как струенаправляющие поперечные перегородки, плетневые изгороди или наплывные конструкции из тканевых материалов.

Системы прудов в качестве приближенных к природе технологических решений очистки сточных вод хорошо зарекомендовали себя во всем мире. В частности, в 2005 г. в земле Саксония-Ангальт (Германия) эксплуатировалось 73 прудовые системы, которые различались как по техническому оснащению (естественная или искусственная аэрация), так и по конфигурации. Такие прудовые системы отличаются низкими инвестиционными и эксплуатационными затратами. При минимальном постоянном обслуживании достигается высокая надежность их работы и на выходе из системы обеспечиваются необходимые параметры [8].

Авторам неизвестны универсальные конфигурации прудов с их характеристиками, поэтому для каждого конкретного региона необходим расчет количества, размеров прудов, их динамических характеристик. Плотность застройки, виды предприятий в окрестности водного объекта, степень загрязнения территории, интенсивность водопользования служат исходными данными для проектирования системы прудов.

Другим приоритетным направлением исследований является определение допустимых нормативов очистки сточных вод. Эта проблема тесно связана с проблемой разработки наилучших существующих технологий (НСТ).

Достижение рыбохозяйственных нормативов при выпуске очищенных сточных вод в водные объекты в черте города для поверхностного стока является не осуществимым по экономическим соображениям. В этом случае альтернативным нормативам ПДК вариантом нормирования может быть установление экологически допустимых нормативов абиотических факторов (ЭДН).

Нормирование качества вод и их экологического состояния по предельно допустимым показателям (ПДК) загрязняющих веществ оказывается экологически неэффективным [9]. Применение установленных в лабораторных опытах нормативов ПДК оправдано, когда отсутствуют данные о состоянии биоты и уровнях абиотических факторов в природных экосистемах. В то время как ЭДН учитывают не изолированные вредные воздействия, а

реально сложившиеся в природе комплексы потенциально вредных воздействий, совокупное действие которых может быть более сильным, нежели эффект прямых влияний. ЭДН носят не общероссийский, а региональный характер, т.е. зависят от фонового уровня абиотических факторов окружающей среды [10].

Например, предложенная в [10] методика установления нормативов состоит из нескольких этапов:

- 1) выбор индикатора состояния биоты;
- 2) принятие границы между благополучными и неблагополучными состояниями;
- 3) выявление уровней значений исследуемого фактора, приводящих к неблагополучным значениям индикаторной характеристики.

Перспективным для практики является выбор представительных биоиндикаторов состояния биоты водных объектов.

Исследования и анализ особенностей организации сообществ гидробионтов должны проводиться с учетом климатических и географических особенностей регионов России, их устойчивости к пределам изменений нормируемых загрязнений, адекватности состояния водоемов и значения биоиндикаторов. В этом случае биоиндикаторы могут применяться для расчета ЭДН.

Метод должен позволить определить ЭДН не только для химических веществ, но и для любых других природных или антропогенных факторов, способных нарушить экологическое благополучие биоты. В частности, необходимо разработать методику и рассчитать ЭДН по антропогенным факторам на городские водные объекты. Например, ЭДН для плотности застройки прибрежной территории водоема, количества организованных и неорганизованных мест рекреации, количества поступающего в водоем поверхностного стока с городской территории и его качества.

Приведенные в статье методы защиты водоемов активно разрабатываются и внедряются за рубе-

жом. Особое внимание при этом уделяется активизации и использованию экологических функций природных объектов. Все более ухудшающееся состояние поверхностных водоемов на территории России подталкивает и отечественных специалистов к разработке новых методов, технологий и устройств защиты и восстановления водных объектов.

#### Список литературы

1. *Эксплуатация, реконструкция и охрана водных объектов в городе.* И. Г. Бойкова, В. В. Волшаник, Н. Б. Карпова, В. Г. Печников, Е. И. Пупырев. М.: АСВ, 2008с.
2. *Яковлев С. В., Воронов Ю. В.* Водоотведение и очистка сточных вод. М.: АСВ, 2004.
3. *Miller, Paul., Harrison, Brad. and Welch, Jennifer.* Infiltration Based Practices for Urban Landscapes // Paper presented at the annual meeting of the SOIL AND WATER CONSERVATION SOCIETY, Saddlebrook Resort, Tampa, Florida, Jul 21, 2007.
4. *Городские деревья стимулируют инфильтрацию* // ВодаMagazine. 2009. № 3. С. 49.
5. *Литвинов А.* На прекрасном голубом Дунае // ВодаMagazine. 2007. № 1. С. 4 – 10.
6. *Кривицкий С. В.* Гидроэкология. Улучшение качества воды в водоеме // Экология и промышленность России. 2007. Июль. С. 18 – 21.
7. *Микрякова Т. Ф.* Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях различного уровня загрязнения водной среды // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 2. С. 253 – 255.
8. *Барьенбрух М., Тешнер К.* Системы прудов для очистки сточных вод в земле Саксония-Ангальт (Германия). Исследование Инженерно-строительного института Технического университета Берлина // ВодаMagazine. 2009. № 1(17). С. 40 – 50.
9. Информационно-аналитическая система “Экологический контроль природной среды по данным биологического и физико-химического мониторинга” / А. П. Левич, Е. А. Забурдаева, Н. Г. Булгаков, В. Н. Максимов, С. В. Мамихин. [www.ecograde.belozersky.msu.ru](http://www.ecograde.belozersky.msu.ru).
10. *Забурдаева Е. А.* Градуировка индексов разнообразия и поиск экологически допустимых уровней абиотических факторов (на примере водных объектов бассейна р. Дон): Материалы международной конференции “Математика. Компьютер. Образование”. [www.mce.biophys.msu.ru](http://www.mce.biophys.msu.ru).

# Учет “бегущей волны” в пространственных задачах сейсмостойчивости грунтовых плотин

Рассказов Л. Н., доктор техн. наук,  
Бестужева А. С., кандидат техн. наук,  
Нгуен Фьонг Лам, инженер

(кафедра гидротехнических сооружений, МГСУ)

По пульсациям сейсмических ускорений в элементах плотины может быть определена максимальная сейсмическая нагрузка как инерционная сила, изменяющаяся во времени.

**Ключевые слова:** гидроэнергетическое строительство, сооружения в сейсмически активных районах, возможность математического моделирования

Задача обеспечения надежного сейсмостойкого строительства в последние годы становится все более актуальной. Это вызвано тем, что сейсмичность многих, ранее считавшихся “спокойными” районов мира повышается, а крупное гидроэнергетическое строительство смещается в горные и малоосвоенные земли. Исследование напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин под действием сейсмических сил является важнейшим этапом проектирования сооружения в сейсмически активных районах. Часто именно особенности работы сооружения при сейсмических нагрузках определяют его конструкцию.

С развитием вычислительной техники и численных методов появляется возможность математического моделирования с учетом все большего числа факторов, влияющих на поведение сооружения при землетрясении, а также инженерного конструирования отдельных элементов. Сегодня известно множество примеров использования оригинальных антисейсмических решений, позволяющих снизить в конструкциях сооружений уровень сейсмических ускорений, например “демпфирующие массы” в сверхвысоких зданиях (Япония, Тайвань). Особенности пространственной работы плотин при землетрясениях, зависящие от направления подхода сейсмической волны, скорости ее распространения,

высоты плотины, ширины и формы створа и прочих факторов, еще недостаточно исследованы. В представленной работе решение задачи сейсмостойкости плотины строится на основе объединения динамического метода решения уравнений вынужденных колебаний при внешнем воздействии, заданном в виде акселерограммы, и уравнений физического состояния грунта, описываемых энергетической моделью грунта [1].

Процесс динамического нагружения материала протекает на фоне статической работы конструкции, поэтому первым шагом в решении поставленной задачи является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины на момент начала землетрясения. При кратковременном динамическом воздействии, каким чаще всего и является землетрясение, можно принять, что грунтовой материал тела плотины ведет себя упруго. Решение динамической задачи в упругой постановке позволяет получить наихудшую картину изменения напряженного состояния плотины во время землетрясения. По пульсациям сейсмических ускорений в элементах плотины может быть определена максимальная сейсмическая нагрузка как инерционная сила, изменяющаяся во времени.

Решение динамической задачи проводится по неявной схеме с определением форм и частот соб-

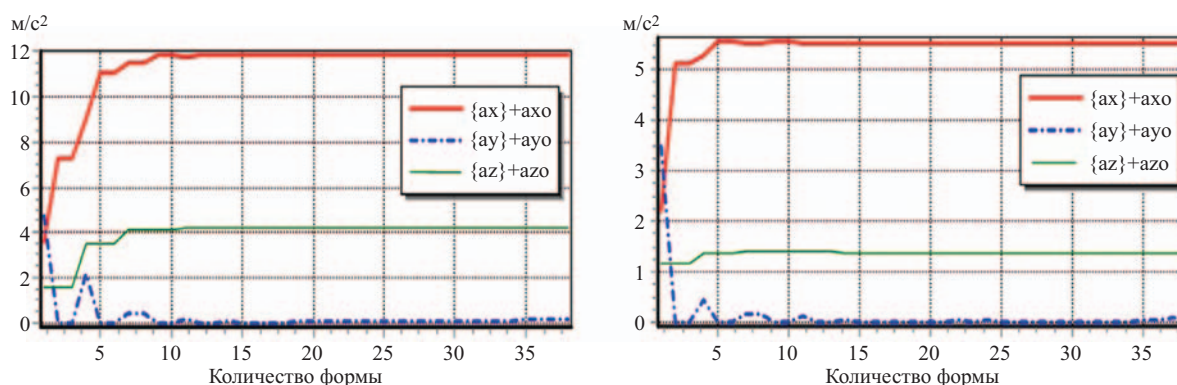


Рис. 1. Изменение максимального ускорения в зависимости от числа учитываемых ФСК и разном затухании

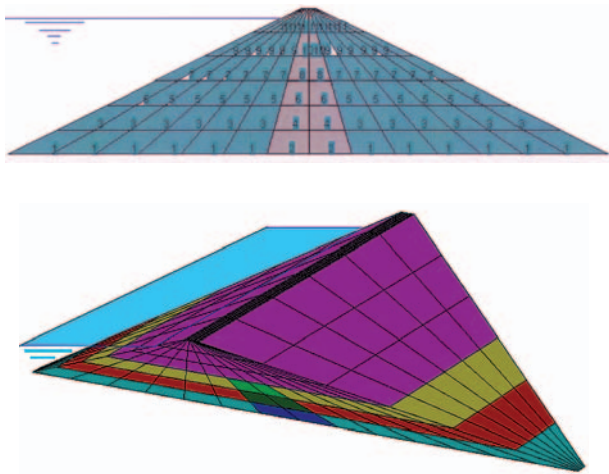


Рис. 2. Сетка МКЭ

ственных колебаний конструкции. Надо отметить, что определение собственных форм и частот колебаний конструкции при решении динамических задач является не только необходимым в ряде методов этапом, но и полезным и информативным решением.

Многочисленные исследования сейсмостойкости грунтовых сооружений показали, что точность решения динамической задачи зависит от числа учитываемых форм собственных колебаний (ФСК). Необходимое количество учитываемых форм при общем числе степеней свободы расчетных конструкций в несколько тысяч ограничивается несколькими десятками — от 20 до 100. Для определения наименьшего расчетного числа ФСК для каждой задачи должно проводиться индивидуальное исследование. Например, на рис. 1, а (при расчете 300-метрового здания башенного типа) видно, что для данного сооружения достаточно учитывать 15 ФСК, поскольку учет большего числа не ведет к изменению сейсмической нагрузки и сейсмических ускорений [2]. Если затухание в расчетной системе увеличивается, то число необходимых для расчета форм собственных колебаний сокращается (рис. 1, б). В данном примере до 10 ФСК.

Полученная в ходе решения динамической задачи сейсмическая нагрузка является изменяющейся во времени функцией, определяющей путь нагружения материала в каждом элементе плотины. Наряду со всеми прочими нагрузками и силами, действующими на сооружение, она может быть использована в физической модели грунта.

На основе метода локальных вариаций в сочетании с МКЭ на каждом шаге сейсмического воздействия, равном шагу оцифровки акселерограммы, согласно принятой “энергетической” модели грунта, производится расчет упругих и пластических деформаций. Последние к концу сейсмического воздействия накапливаются и составляют полную

величину остаточных перемещений в плотине после землетрясения.

При расчетах напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин, как правило, основными критериями работоспособности являются величины напряжений и остаточных деформаций. Однако только этих величин недостаточно для того, чтобы судить об уровне надежности и безопасности сооружения. В грунтовых плотинах, где процесс многократного “нагружения и разгрузки” при землетрясении протекает не упруго, важным критерием является параметр прочностного состояния грунта, который в энергетической модели назван коэффициентом надежности  $K_n$ . Этот параметр определяет запас прочности в грунте по отношению к предельному, и равенство  $K_n = 1$  означает предельное состояние грунта.

Прочностное состояние грунта в каждой точке плотины во время землетрясения меняется ежесекундно, согласно шагу оцифровки акселерограммы, то приближаясь к предельному состоянию, то удаляясь от него, что говорит о формировании областей течения материала. В зависимости от того, в каком направлении развивается картина изменения прочностного состояния в той или иной зоне плотины, можно судить об уровне безопасности сооружения при возможных повторных сейсмических воздействиях.

При решении динамических задач важна не только оценка параметров собственных форм и частот колебаний плотины, но и оценка величин максимальных ускорений, возникших в тех или иных элементах плотины при землетрясении. Пульсация сейсмических ускорений при решении упругой задачи является одним из важнейших критериев работы сооружения. Действительно, спектральное представление о сейсмической нагрузке как о сумме элементарных гармоник, характеризуемых своей частотой, начальной фазой смещения и своим коэффициентом затухания, позволяет прогнозировать, что наиболее “динамичными” будут те системы, чьи частоты собственных колебаний будут наиболее близкими к частотам наиболее интенсивных колебаний в спектре землетрясения. Под степенью динамичности системы подразумевается отношение максимального ускорения в свободных узлах сооружения к заданному ускорению в основании. В линейно-спектральной теории динамические свойства конструкции описываются коэффициентом динамичности  $\beta$ , который согласно последней редакции СНиП П-7-81 не превышает 2,5.

Часто при решении динамических задач для бетонных плотин и невысоких грунтовых сооружений принимается, что все элементы в основании плотины перемещаются как одно целое, будто плотина расположена на жесткой платформе, которая



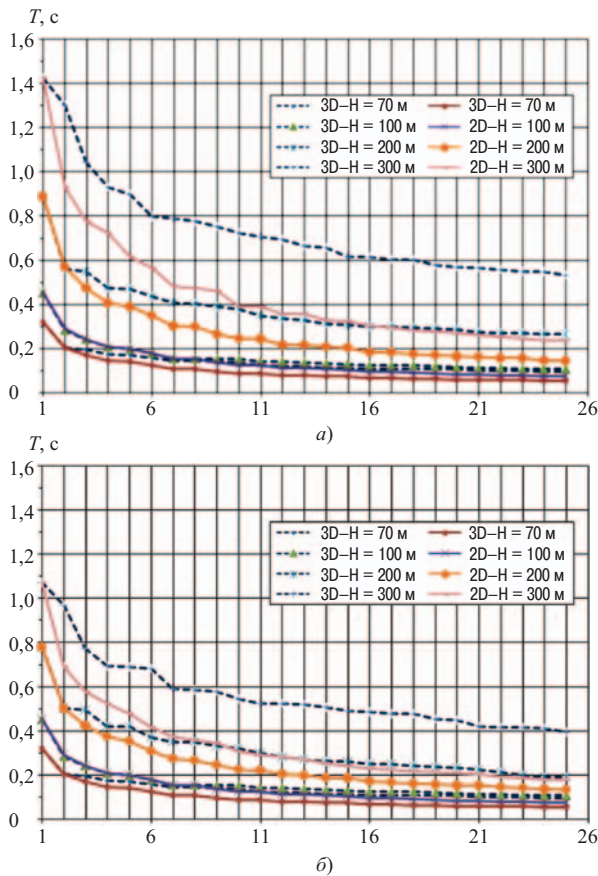


Рис. 3. Периоды собственных колебаний плотины в плоской (2D) и пространственной постановках (3D):

претерпевает сейсмические колебания с ускорениями согласно заданной акселерограмме. В действительности это не так. Грунтовые сооружения, сильно распластанные по основанию, имеют ширину, сопоставимую с длиной сейсмической волны. Это означает, что в основании плотины при землетрясении могут действовать ускорения не только различные, но и разного знака. Учет этого обстоятельства, названного эффектом “бегущей волны”, для высоких грунтовых плотин в плоской постановке впервые был рассмотрен в работах [3, 4].

Сама идея учета “бегущей волны” в расчетах высоких грунтовых сооружений была высказана в совместном докладе Chopra A. K., Dibaj M., Clough R., Penzien J., Seed H. [5] на Втором Конгрессе по сейсмостойкому строительству, проходящему в 1969г в Чили. Учет эффекта “бегущей волны” в сильно распластанных по основанию сооружениях при продольном (вдоль русла) направлении подхода сейсмической волны приводит к увеличению их сейсмоустойчивости. Ввиду ограниченности размеров бетонных плотин по основанию и большой скорости сейсмических волн в скальных грунтах учет “бегущей волны” при расчетах бетонных плотин в плоской постановке вообще не рассматривался. Сегодня с помощью мощных вычислительных машин возможно решение динамических задач в

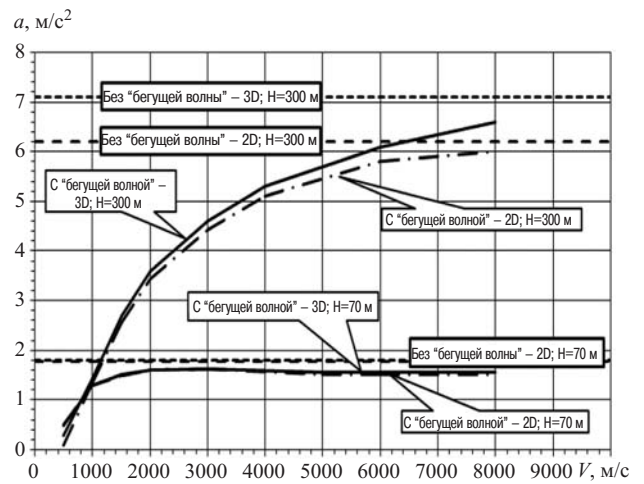


Рис. 4. Влияние скорости распространения сейсмической волны на ускорения гребня плотины

пространственной постановке при любом направлении подхода сейсмической волны к створу плотины. Это позволяет рассматривать эффект “бегущей волны” и для бетонных сооружений, сильно вытянутых по створу, когда направление распространения волны совпадает с осью створа плотины. В этом случае эффект “бегущей волны” будет проявляться в работе сооружений любого типа и любой высоты. Особенно актуальными такие расчеты могут оказаться для исследования сейсмостойкости контрфорсных, а также арочных и гравитационных плотин.

Уравнение движения с учетом скорости распространения волны в основании сооружения (вдоль оси  $x$ ) имеет вид [6]

$$[M]r + [C]r + [K]r = - \sum_{k=1}^{Nb} [M]b_{3k}r_{s,3k}^b - \sum_{k=1}^{Nb} [M]b_{3k-1}r_{s,3k-1}^b - \sum_{k=1}^{Nb} [M]b_{3k-2}r_{s,3k-2}^b, \quad (1)$$

где  $r_{s,3k-2}^b(t) = U_{ox}(t - \frac{x_k}{V})$ ;  $r_{s,3k-2}^b(t) = U_{oy}(t - \frac{x_k}{V})$ ;

$r_{s,3k}^b(t) = U_{oz}(t - \frac{x_k}{V})$ ;

$N_b$  — число узлов на контакте с основанием;  $X_k$  — абсцисса  $k$ -го узла в основании плотины;  $V$  — скорость распространения сейсмической волны в основании плотины;  $\{b_{3k-1}\}$  — вектор влияния, т.е. вектор смещения узловых точек в плотине при смещении  $k$ -го узла основания в направлении  $X$  на  $-1$ ;  $r_{s,3k-2}^b(t)$  — вектор ускорений узлов основания в момент времени  $t$ , полученный с учетом времени добегаания сейсмической волны до рассматриваемого узла (по направлению  $x$ ).

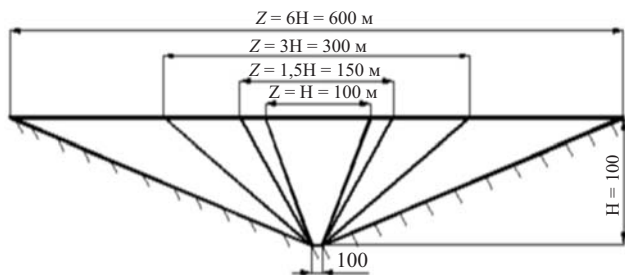


Рис. 5. Формы створа плотин

Следует отметить, что учет влияния скорости распространения сейсмической волны в перпендикулярном направлении  $Z$  ведет к изменению ускорений в узлах основания за счет смены лишь координаты  $X_K$  на  $Z_K$ . При произвольном направлении подхода сейсмической волны к створу плотины ускорение в основании может быть получено по правилу параллелограмма.

При больших скоростях распространения сейсмических волн в основании плотины (крепкие скальные породы) эффект от учета бегущей волны снижается, а при  $V \rightarrow \infty$  решение будет соответствовать динамической задаче без учета “бегущей волны”.

Векторы влияния  $\{b_{3k-2}\}, \{b_{3k-1}\}, \{b_{3k}\}$ , представляющие собой столбцы матрицы влияния  $[b_k]$ , могут быть найдены в ходе решения системы алгебраических уравнений:

$$[K][b_k] = -[q_k], \quad (2)$$

где  $[K]$  — матрица жесткости системы;  $[q_k]$  — окаймляющая часть матрицы жесткости, построенная для закрепленных узлов в основании.

Учет скорости распространения сейсмических волн в основании плотины позволяет исследовать очень сложные аспекты работы плотин на различ-

ных основаниях. В данной работе приведены результаты расчетов грунтовых плотин различной высоты в разных по форме створах и на различных грунтах основания. Все расчеты выполнены на типовую акселерограмму Паркфилд с максимальным ускорением  $0,28g$  по горизонтальной составляющей. В работе рассматриваются три возможных направления подхода сейсмической волны к створу плотины: вдоль русла ( $0^\circ$ ), вдоль створа плотины ( $90^\circ$ ) — “бортовое” направление, под углом к створу —  $45^\circ$ .

**Периоды собственных колебаний плотин.** В качестве первого исследования в работе приведено сопоставление периодов для первых 25 ФСК каменно-земляной плотины 70-, 100-, 200- и 300-метровой высоты при решении задачи о собственных значениях в плоской и пространственной постановках (рис. 2). Форма створа в пространственной задаче принята прямоугольной с длиной по гребню, равной высоте плотины.

В первом расчете характеристики грунтов приняты постоянными по высоте плотины и равными средним значениям их изменения по глубине. На рис. 3, а представлены периоды собственных колебаний плотин разной высоты. Во втором расчете (рис. 3, б) характеристики грунтов были приняты изменяющимися по высоте плотины в соответствии с действующими статическими напряжениями согласно таблице.

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

с увеличением высоты плотины увеличивается разница между решением задач в плоской и пространственной постановках;

периоды основного тона колебаний в плоской и пространственной задачах совпадают;

спектр собственных частот в пространственных задачах более густой, чем в плоских;

#### Изменения динамических характеристик грунтов в зависимости от глубины залегания

Глубина залегания	$h$ , м	0	20	40	60	80	120	180	320
Гравийный галечник $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$	$v_p$ , м/с	600	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1780
	$v_s$ , м/с	300	470	560	600	635	700	760	900
	$E$ , МПа	528	1330	1880	2170	2440	2940	3450	4740
	$\mu$	0,333	0,358	0,361	0,365	0,370	0,361	0,354	0,328
Суглинок $\gamma = 1,7 \text{ т/м}^3$	$v_p$ , м/с	500	1100	1320	1450	1570	1700	1750	1800
	$v_s$ , м/с	200	450	530	600	640	700	720	760
	$E$ , МПа	190	970	1350	1710	1960	2330	2470	2740
	$\mu$	0,405	0,400	0,404	0,397	0,400	0,398	0,398	0,392

учет изменения свойств грунтов по высоте плотины ведет к снижению периода основного тона, например, для 300-метровой плотины с 1,4 до 1,18 с.

**Влияние скорости распространения сейсмической волны.** В работе приведены результаты расчетов влияния скорости распространения сейсмических волн для плотин 70- и 300-метровой высоты, рассмотрены плоская (2D) и пространственная (3D) задачи. Результаты решений представлены в виде максимальных ускорений, полученных на гребне плотины во время прохождения сейсмической волны. Направление распространения сейсмической волны принято со стороны верхнего бьефа в нижний.

На основании представленных графиков (рис. 4) можно сделать следующие выводы:

учет скорости распространения сейсмических волн для высоких плотин, расположенных на полускальном основании, дает снижение сейсмических ускорений на гребне плотины в 3 – 5 раз. Например, максимальное ускорение на гребне 300-метровой плотины в пространственной задаче составляет 0,73g, а при учете “бегущей волны” для полускального основания с  $V = 700 - 1000$  м/с снижается почти в 5 раз до — 0,15g;

для невысоких плотин эффект от учета “бегущей волны” пропадает при скоростях сейсмических волн более 2000 м/с;

для полускальных оснований со соростями сейсмических волн 500 – 1000 м/с максимальные ускорения на гребне практически не зависят от высоты плотины, но зависят линейно от скорости сейсмической волны;

расхождение между решениями по плоской и пространственной схемам увеличивается с увеличением высоты плотины, а учет “бегущей волны” нивелирует эту разницу;

учет скорости распространения сейсмической волны (при полускальных грунтах основания) оказывает большее влияние на результаты расчетов, нежели решение плоской или пространственной задачи.

**Влияние формы створа.** В работе приводится сравнение ускорений на гребне 100-метровой плотины, расположенной в разных по ширине створах, изменяющихся от 1 H до 6 H (рис. 5). Форма створа принята треугольной.

По береговым примыканиям в пространственной задаче принимается жесткое закрепление по всем направлениям. Для сравнения приводится и решение плоской задачи в расчете на 1 пог. м ширины плотины по створу. На рис. 6 изображены графики изменения периодов собственных колебаний плотин.

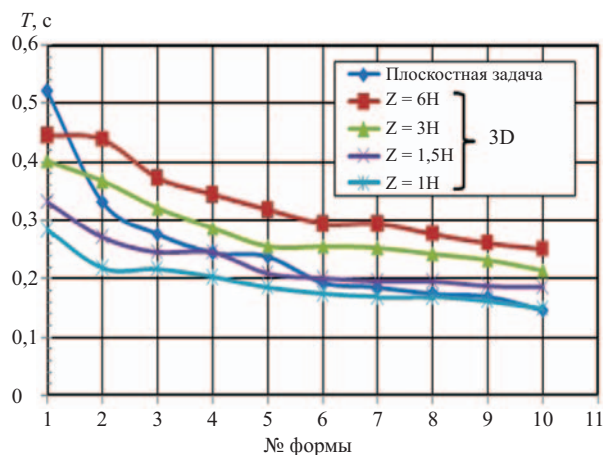


Рис. 6. Периоды собственных колебаний плотин в разных по ширине створах

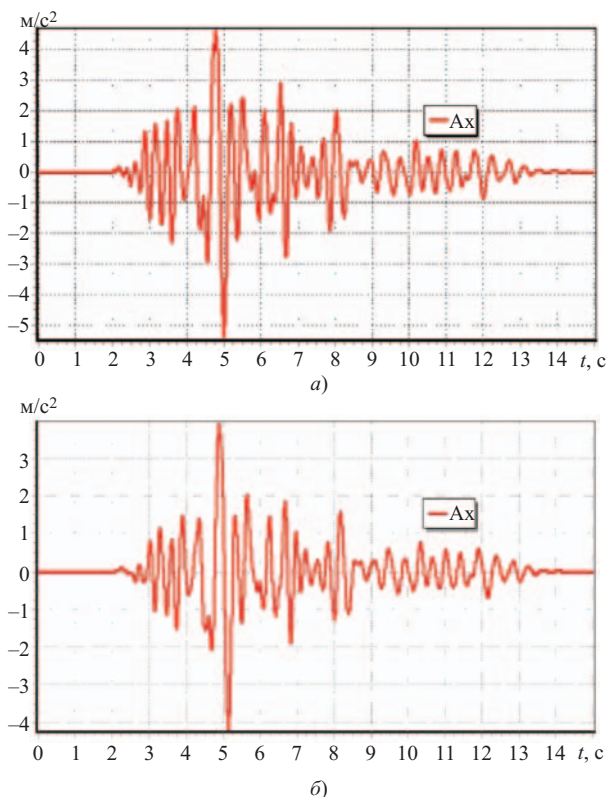
Очевидно, что с увеличением ширины створа увеличивается объем плотины и период основного тона. Для 100-метровой плотины в широком створе ( $z = 6H$ ) он составляет 0,45 с, в узком створе ( $z = H$ ) равен 0,15 с.

Интересно, что спектр периодов в плоской задаче охватывает практически весь диапазон периодов колебаний 100-метровой плотины в различных по ширине створах.

Изменение характера пульсаций сейсмических ускорений при учете “бегущей волны” хорошо видно на графиках для 100-метровой плотины, расположенной в створе шириной 3 H. Максимальные ускорения на гребне без учета “бегущей волны” составили 5,4 м/с<sup>2</sup> (рис. 7, а), а при учете снизились до 4,2 м/с<sup>2</sup> (рис. 7, б). Таким образом, неравномерность сейсмических ускорений в основании плотины приводит к выравнивающему и перераспределяющему эффекту, что ведет к общему снижению сейсмических ускорений в теле плотины.

Увеличение ширины створа, как отмечалось ранее, ведет к увеличению периодов собственных колебаний плотины и к росту сейсмических ускорений на гребне плотины. Так, в узком створе (1 H) максимальное ускорение на гребне составляет 0,28g, что совпадает с величиной ускорения в основании. Если это сравнить с величиной коэффициента динамичности, которым пользуются в спектральной теории, то он будет равен 1,0. Учет “бегущей волны” в узком створе снижает ускорение на гребне до 0,2g, т.е. на 28 %, при этом коэффициент динамичности составит 0,7.

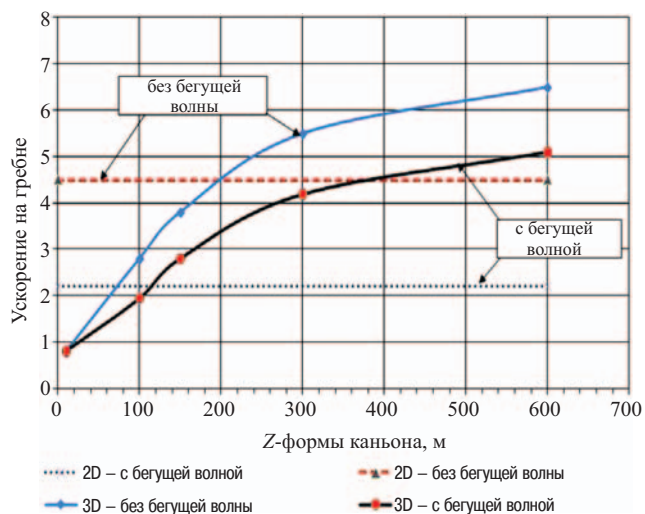
В широком створе (6 H) максимальное ускорение на гребне увеличивается до 0,65g, что дает усиление колебаний в 2,3 раза. Учет “бегущей волны” для этой задачи снижает ускорение до 0,52g, т.е. на 20 %, что по аналогии со спектральным методом будет соответствовать коэффициенту динамичности 1,86.



**Рис. 7.** Изменение характера пульсаций ускорений на гребне плотины:

*a* — без учета “бегущей волны”; *b* — с учетом “бегущей волны”;  $V = 1500$  м/с. Ширина створа составляет  $3H$

На рис. 8 видно, что графики ускорений, полученные для плоской и пространственной задач при расчетах без учета “бегущей волны”, пересекаются. Это означает, что в некоторых диапазонах ширины створа плоская задача будет давать завышенные значения по ускорениям на гребне, а в некоторых



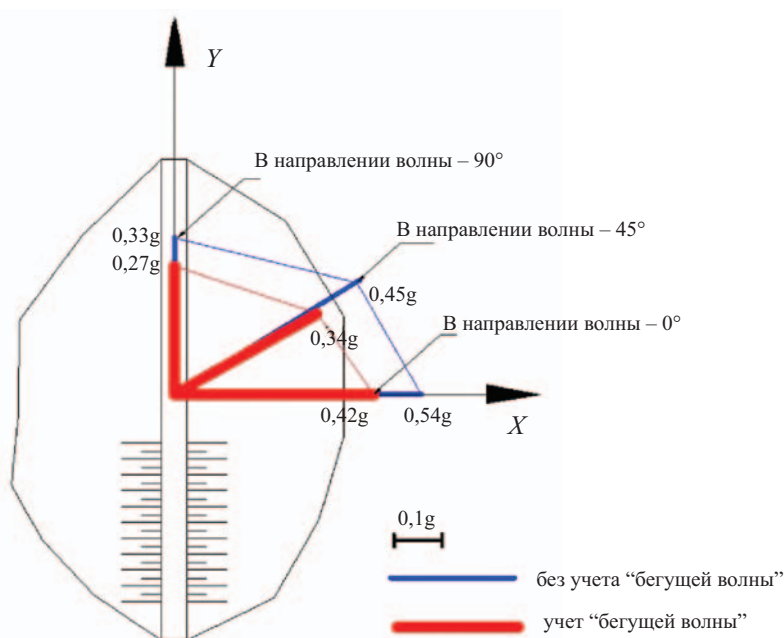
**Рис. 8.** Изменение ускорений на гребне плотины в зависимости от формы каньона и учета “бегущей волны”

— заниженные. В нашем примере расчета 100-метровой каменно-земляной плотины завышенные значения ускорений (в 2–2,5 раза) будет давать плоская задача, если ширина створа не более  $2H$ . В створах более  $2H$  пространственное решение дает увеличение ускорений, которое с увеличением ширины створа увеличивается.

На основании представленных материалов можно сделать следующий вывод:

увеличение ширины створа ведет к увеличению ускорений на гребне плотины;

учет “бегущей волны” снижает максимальные ускорения на гребне плотины на 20–28% в зависимости от ширины створа. Больше влияние относится к узким створам;



**Рис. 9.** Изменение ускорений на гребне плотины при изменении направления подхода сейсмической волны к створу плотины

для узких створов решение задачи в плоской постановке дает завышенные значения ускорений на гребне плотины и, напротив, для широких створов — заниженные. Эта “граничная” ширина створа в задачах без учета “бегущей волны” составляет около  $2H$ , а с учетом — всего  $1H$ .

**Влияние направления подхода сейсмической волны к створу.** В работе проведено сравнение максимальных ускорений на гребне плотины в точке, расположенной по середине створа, для динамических задач с учетом и без учета “бегущей волны”, если направление подхода сейсмической волны к створу плотины изменяется. Рассматриваются три варианта направления волны: вдоль русла ( $0^\circ$ ), вдоль створа ( $90^\circ$ ), под углом к створу ( $45^\circ$ ). Результаты решения представлены в виде диаграммы на рис. 9. Как видно на диаграмме, при русловом подходе сейсмической волны к створу плотины получены максимальные ускорения  $0,54g$  по оси  $0x$ . Если сейсмическая волна того же характера и той же интенсивности будет распространяться вдоль створа плотины, то ускорения в том же узле по этому направлению (ось  $0y$ ) станут меньше —  $0,33g$ . При этом ускорения по оси  $0x$  малы —  $0,02g$ . При подходе сейсмической волны к плотине со стороны верхнего бьефа под углом  $45^\circ$  ускорения по обеим компонентам имеют различные значения. По направлению  $0x$  максимальное ускорение составляет  $0,39g$ , а по направлению  $0y$  —  $0,24g$ . Результирующее ускорение составляет  $0,45g$ , а вектор его направления отклоняется от направления исходного сейсмического воздействия в сторону русла реки (оси  $0x$ ).

## Выводы:

1. Учет “бегущей волны” в пространственной постановке дает существенное уточнение действующих сейсмических нагрузок в грунтовой плотине:

в сторону увеличения сейсмических нагрузок, если сравнивать с решением плоской задачи;

в сторону снижения сейсмических нагрузок, если расчет сравнивать с пространственной задачей без учета “бегущей волны”.

2. Форма и ширина створа существенно влияют на величину сейсмических нагрузок в плотине. Вопрос необходимости расчета плотин в пространственной постановке наиболее остро стоит для узких створов, в которых учет “бегущей волны” ведет к раскрытию резервов пространственной работы конструкции.

3. Для принятой в расчете конструкции плотины наилучшим направлением подхода сейсмической волны к плотине следует признать направление вдоль русла. В то же время это требует дальнейшего исследования на примерах других конструкций.

## Список литературы

1. *Гидротехнические сооружения: Учебник для вузов / Под ред. Л. Н. Рассказова.* — М.: АСВ, 2008.
2. *Бестужева А. С., Нгуен Фьонг Лам.* Динамический и спектральный методы определения сейсмической нагрузки, действующей на сооружение при землетрясении // Вестник МГСУ. 2010. № 1.
3. *Рассказов Л. Н., Бестужева А. С.* К вопросу сейсмостойкости грунтовых плотин // Строительная механика и расчет сооружений. 1989. № 2.
4. *Бестужева А. С.* Сейсмостойкость грунтовых плотин: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М., 1994.
5. *Chopra A. K., Dibaj M., Clough R., Penzien J., Seed H.* Earthquake analysis of earth dams // 2-й Конгресс по сейсмостойкому строительству PROG, 4-WCEE. — Chili, 1969.

# Поровое давление в грунтовых плотинах при сейсмических воздействиях

Рассказов Л. Н., доктор техн. наук,  
Бестужева А. С., кандидат техн. наук,  
Нгуен Фыонг Лам, инженер

(кафедра гидротехнических сооружений, МГСУ)

Понятие прочности и устойчивости каменно-земляной плотины при землетрясении связано с двумя аспектами ее работы: с устойчивостью откосов и с прочностным состоянием противифльтрационного элемента плотины (ядра, экрана).

**Ключевые слова:** водоупорный элемент плотины, поровое давление, коэффициентом фильтрации

Взаимодействие грунтовых сооружений с водной средой при сейсмических воздействиях до настоящего времени остается недостаточно изученной областью гидротехники. С одной стороны, это дополнительное давление воды верхнего бьефа на водоупорный элемент плотины, учитываемое в расчетах как дополнительная инерционная нагрузка; с другой — это избыточное поровое давление в грунтовом теле плотины, приводящее к снижению параметров ее прочности и устойчивости. Все эти особенности динамического взаимодействия грунта с водной средой многогранно проявляются в работе каменно-земляных плотин.

Понятие прочности и устойчивости каменно-земляной плотины при землетрясении связано с двумя аспектами ее работы: с устойчивостью откосов и с прочностным состоянием противифльтрационного элемента плотины (ядра, экрана).

До последнего времени возникновение порового давления при сейсмических нагрузках изучалось только в песчаных грунтах, так как считалось, что в крупнообломочных грунтах, обладающих большим коэффициентом фильтрации и малой сжимаемостью, сколько-нибудь значительного порового давления не возникает, к тому же оно практически сразу затухает за счет высокой фильтрации. Между тем, данные по натурным наблюдениям за деформациями каменно-земляных плотин [5], перенесших землетрясения (оползания откосов и трещины), говорят о необходимости дополнительных исследований данного вопроса.

В водонасыщенных грунтах вследствие потери контактов между частицами часть нагрузки (иногда вся нагрузка) от собственного веса и от дополнительного динамического воздействия передается на водную фазу. Избыточное поровое давление в противифльтрационном элементе плотины в конце строительного периода и до окончания наполнения водохранилища присутствует всегда. Однако по мере оттока поровой жидкости через дренажную систему переходных зон оно рассеивается, грунт

при этом оседает. Процесс консолидации происходит до тех пор, пока не начнет расти гидростатическое давление в ядре, связанное с подъемом уровня верхнего бьефа и фильтрацией через ядро. Как правило, в конце строительного периода в ядре наблюдается неустановившаяся фильтрация.

Повышение порового давления происходит как в призме, так и в противифльтрационном элементе плотины. Повышение порового давления в верховой призме, ранее считавшееся несущественным из-за его быстрого рассеивания (при высоком значении коэффициента фильтрации), в настоящее время рассматривается как главная причина таких распространенных явлений в водонасыщенных грунтах, как разжижение сыпучих грунтов при землетрясении. Потеря несущей способности грунта в верховой призме ведет к формированию поверхностей обрушения на верховом откосе, к появлению трещин вдоль гребня плотины.

Физические уравнения, описывающие процесс изменения порового давления в элементах плотины при статических и динамических нагрузках получены на основе теории фильтрационной консолидации, разработанной В. А. Флориным. Уравнение консолидации трехфазной земляной среды для условий плоской деформации имеет вид

$$\frac{1}{1+\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \beta \frac{\partial P_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{\phi}^x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{\phi}^y \frac{\partial H}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент пористости;  $\beta$  — коэффициент водоотдачи и водопоглощения грунта;  $P_v$  — поровое давление;  $k_{\phi}^x$  — коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении;  $k_{\phi}^y$  — то же, в вертикальном направлении;  $H$  — напорная функция;  $t$  — время.

Использование в пространственной задаче напряженно-деформированного состояния плотины плоской модели движения фильтрационного потока

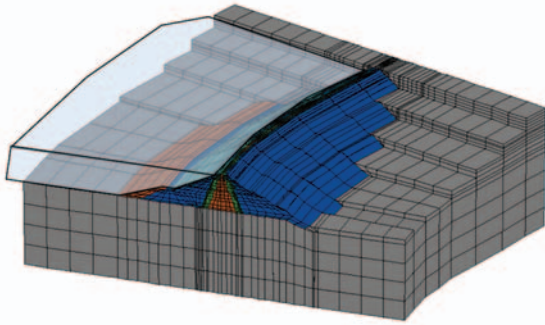


Рис. 1. Сетка МКЭ, плотина Яли (Вьетнам)

(из верхнего бьефа в нижний бьеф) не противоречит постановке приведенного в работе примера. Поскольку борта и основание плотины представлены крепкими, малотрещиноватыми скальными породами, то движения фильтрационного потока по направлению к бортам нет. Более того. Плоская задача в фильтрационном отношении может быть сведена к одномерной, если принять условие горизонтального оттока воды, что равносильно учету большой фильтрационной анизотропии в грунте, когда  $k_{\phi}^x > k_{\phi}^y$ . Это допущение справедливо для большинства ядер плотин, возводимых методом послойного уплотнения. Исследования показали, что в них соотношение коэффициентов фильтрации составляет 10 и более.

То же можно сказать и о галечниковом грунте призмы. Как показали исследования, проводимые Саогидропроектом в г. Нуреке, плотно уложенная гравелисто-галечниковая смесь имела вертикальный коэффициент фильтрации  $K_{\phi} = 5 \dots 25$  м/сут, тогда как горизонтальный коэффициент превышал 200 ... 1000 м/сут. Подобная анизотропия объясняется расслоением гравийно-галечниковой смеси при отсыпке с образованием отдельных проницаемых обеспесоченных галечниковых слоев [4].

Приняв допущение по анизотропии укладываемых в тело плотины грунтов, А. А. Ничипорович совместно с Т. И. Цыбульник получил решение одномерной задачи о консолидации в замкнутом виде. Решения для определения величины порового давления, вызванного изменением внешней нагрузки (собственным весом, сейсмическим импульсом), а также фильтрационным воздействием водного потока, приведены в [4].

При землетрясении расчет порового давления производится по величине приращения сейсмической нагрузки подобно изменению нагрузки от собственного веса. В каждый момент времени, соответствующий шагу оцифровки акселерограммы ( $\Delta t \approx 0,005$  с), в плотине под действием сейсмической силы происходит изменение напряженного состояния, которое в случае положительного прира-

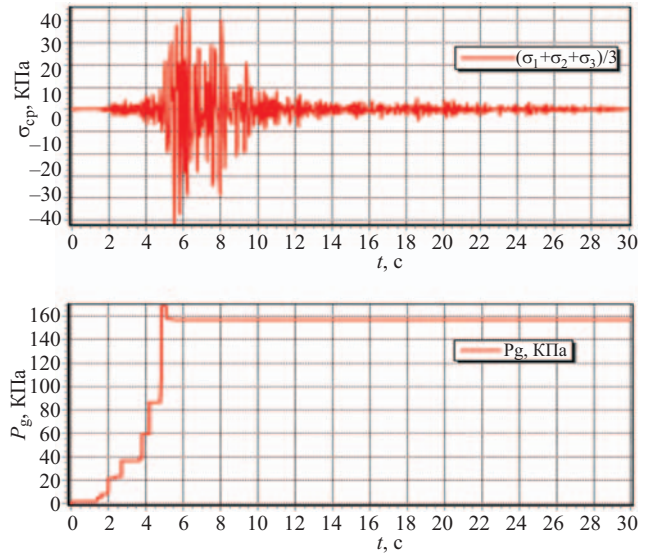


Рис. 2. Пульсация динамических напряжений (а) и рост порового давления (б) в основании ядра во время землетрясения

щения напряжений вызывает рост порового давления. При этом предполагается, что снижение порового давления в рассматриваемом элементе может происходить только вследствие оттока избыточной поровой воды из грунта, т.е. рассеивание порового давления как в ядре, так и в призме происходит со скоростью фильтрации рассматриваемого грунта. Изменение сил порового давления в узлах плотины также участвует в сборе всех динамических нагрузок, действующих на плотину во время землетрясения.

Решение задачи основано на “энергетической” модели грунта профессора Л. Н. Рассказова [1], учитывающей упруго-вязко-пластический характер деформирования грунта под нагрузкой, которая на каждом расчетном этапе изменяется.

В качестве расчетных этапов рассматриваются этапы статической работы плотины во время строительства, а также динамические этапы, связанные с сейсмическими нагрузками, возникающими в плотине при землетрясении. Учет сил порового давления производится как на статических, так и на динамических этапах работы сооружения.

Величины сейсмических нагрузок определяют как инерционные силы по величине пульсации ускорений в узлах плотины, в ходе решения динамической задачи по неявной схеме с определением собственных форм и частот колебаний конструкции [2]. Если предположить, что сооружение при землетрясении ведет себя упруго (в том числе и грунтовое сооружение), то полученная инерционная нагрузка будет определяться как максимально возможная, изменяющаяся во времени функция.

При численных исследованиях нарушение устойчивости грунта в области верхового откоса проявляется в виде больших остаточных смещений и

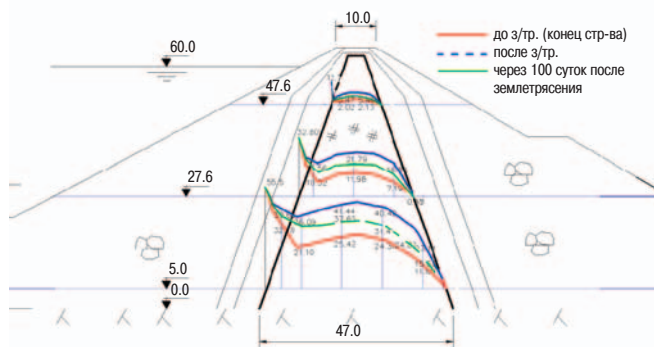


Рис. 3. Изменение порового давления в ядре плотины: после окончания строительства, после землетрясения, через 100 сут после конца строительства

явлений текучести материала (предельное состояние) в зоне преобладания девиатора напряжений. В центральных зонах плотины, в зоне всестороннего сжатия прочностное состояние оценивается величиной коэффициента запаса на трещинообразование ( $K_{н, тр}$ ), картина распределения которого в противодиффузионном элементе плотины дает информацию о возможности гидравлического разрыва ядра, о формировании сквозных путей фильтрации по трещинам в ядре и примыканиях.

В работе проведена комплексная оценка пространственного напряженно-деформированного состояния каменно-земляной плотины гидроузла Яли, расположенного на р. Сесан во Вьетнаме. При решении была использована аналоговая акселерограмма Паркфилд продолжительностью 30 с с максимальным ускорением 0,28g. Особое внимание в работе уделено роли и влиянию порового давления, возникающему при землетрясении в ядре и верхней призме плотины, на показатели устойчивости и прочности плотины.

Пространственная схема разбивки плотины и основания на конечные элементы представлена на рис. 1.

Основные деформационные и прочностные характеристики грунтов тела плотины и основания даны в таблице.

При решении поставленной задачи предполагалось, что землетрясение происходит после окончания строительства плотины и завершения наполнения водохранилища.

*Поровое давление в ядре.* Максимальное поровое давление в основании ядра на момент окончания строительства составило 0,3 МПа, а максимальные сжимающие напряжения в той же точке

#### Основные параметры деформируемости грунтов плотины и основания

Наименование грунта	Параметры										Кулон-Мор		Динамика	
	модуль объёмной деформации $E_0$ при $s = 1 \text{ т/м}^2$ и $t = \infty$	показатель степени $n$	модуль пластических деформаций сдвига $G_0$ при $\sigma = 1 \text{ т/м}^2$ и $t = 0$	начальная энергия деформирования $U_0$	удельный вес грунта $\gamma$	удельный вес грунта во взвешенном состоянии $\gamma_{взв}$	функция коэффициента Пуассона $f(\nu)$	модуль объёмной деформации при разгрузке $E_{0.p.}$	модуль сдвига при разгрузке $G_{0.p.}$	Коэффициент фильтрации $K_f$	угол внутреннего трения $\Phi$	сцепление $C$	динамический модуль упругости $E$	Коэффициент Пуассона $\mu$
Гравийно-галечниковый грунт основания	4000	0,90	8000	2,00	2,20	0,00	0,33	25 000	19 000	2,10 – 5	38	10	500 000	0,3
Суглинистый грунт ядра	750	0,60	1000	1,00	2,05	1,10	1,00	10	6,67	1,10 – 2	23	4	210 000	0,36
Гравийно-галечниковый грунт упорной призмы	1890	0,80	4500	0,80	2,10	1,31	1,20	19	14,5	1,10 – 2	33	0	210 000	0,36
Каменная наброска	1610	0,61	6500	0,30	2,20	1,24	1,20	16	17	5,10 – 1	35	0	210 000	0,36
Грунты переходных зон	1700	0,80	3500	0,80	1,80	1,12	1,20	19	14,5	1,10 – 2	23	0	180 000	0,39
Суглинистый грунт экрана, отсыпанный в воду	250	0,60	450	0,70	0,00	1,02	1,00	5	3,3	5,10 – 6	21	2,5	180 000	0,39



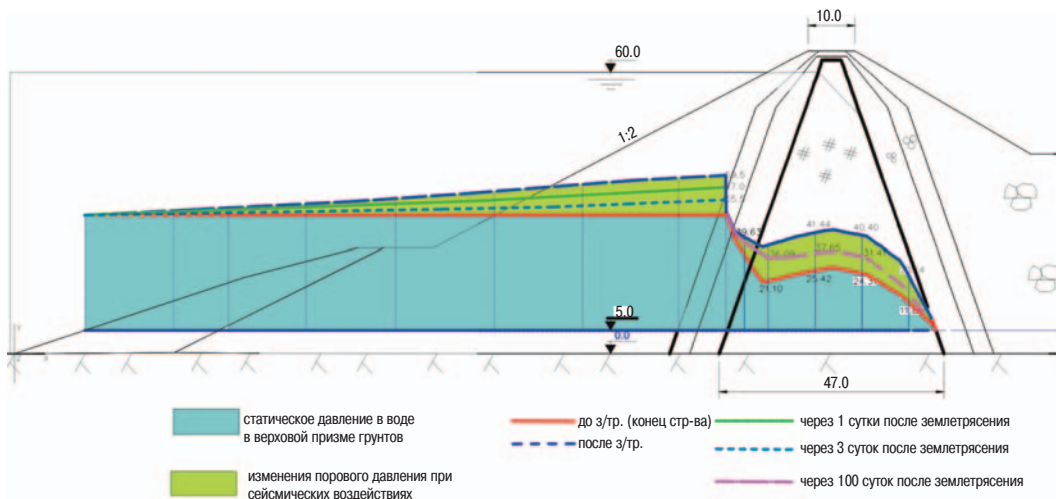


Рис. 4. Рост порового давления и его рассеивание в ядре и призме плотины Ял: после землетрясения

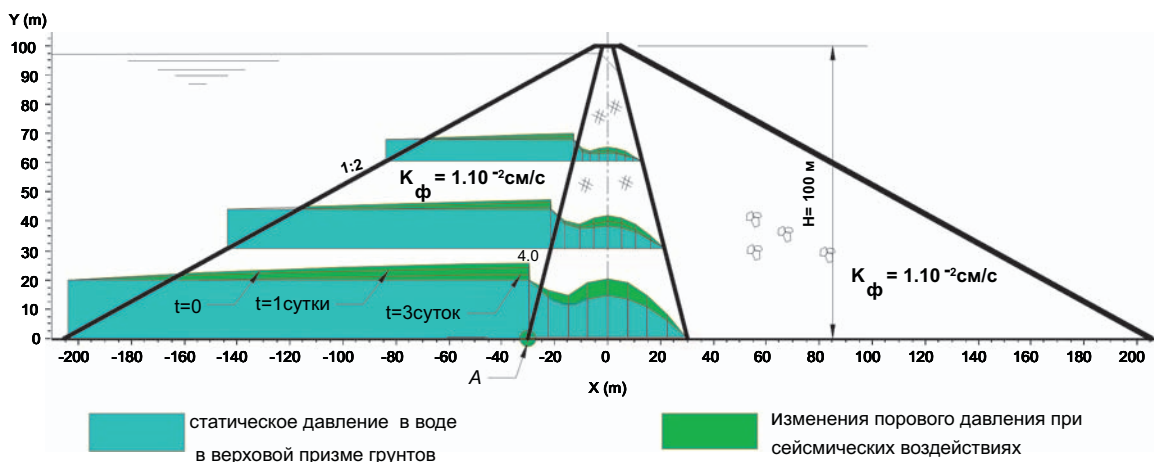


Рис. 5. Максимальное поровое давление в верховой призме после землетрясения (т. А) и его рассеивание

$\sigma_y = -1$  МПа. За время наполнения водохранилища максимальное поровое давление в ядре рассеялось до 0,25 МПа.

При землетрясении в рассматриваемом узле пульсация динамических напряжений, показанная на рис. 2, а, вызывает рост порового давления (рис. 2, б), которое увеличивается почти на 165 кПа, т.е. почти вдвое по сравнению со значением на момент начала землетрясения.

Распределение порового давления по горизонтальным сечениям ядра представлено на рис. 3. Вблизи основания максимальное поровое давление по центральной оси ядра после землетрясения достигает 414 кПа, вблизи напорной грани — около 360 кПа. Для ядра проведен расчет величины рассеивания порового давления через 100 сут, эпюры представлены на рис. 3 пунктирной линией. Как видно, рассеивание порового давления в ядре ведет к выравниванию эпюры порового давления по сече-

нию и приближению ее к треугольному виду с максимумом давления на напорной грани.

*Поровое давление в призме.* Особое внимание в работе уделено вопросу появления и времени суще-

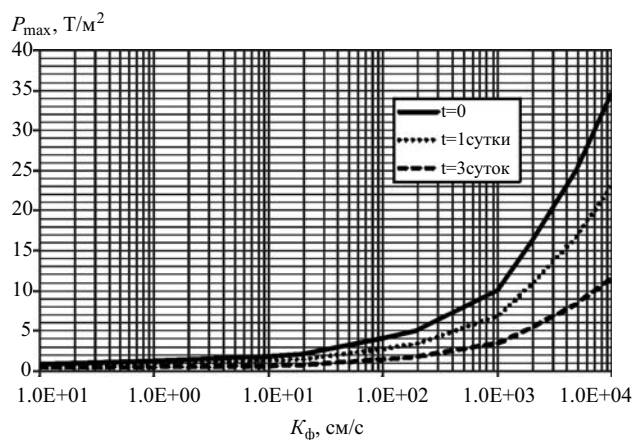


Рис. 6. Максимальное поровое давление в верховой призме при землетрясении и его рассеивание при различных фильтрационных свойствах грунта призмы

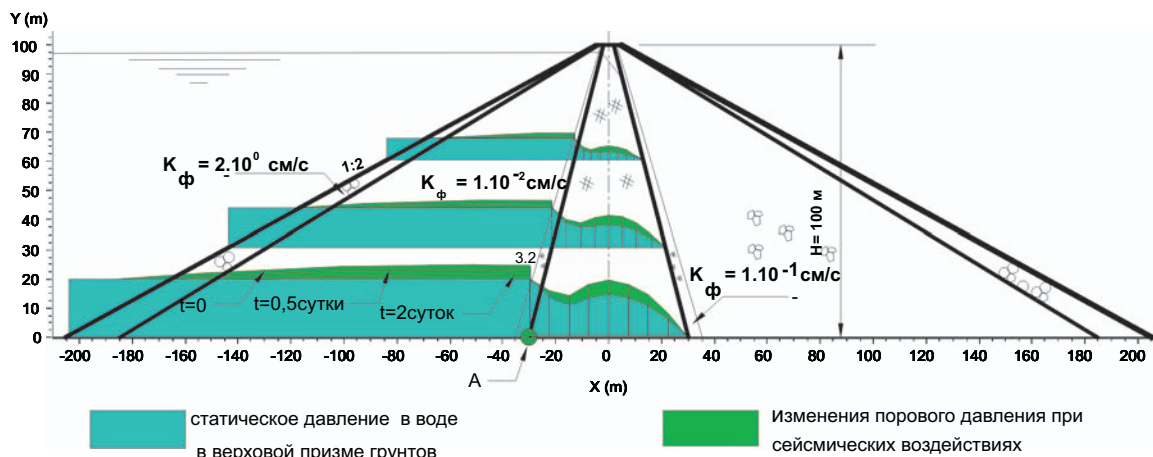


Рис. 7. Максимальное поровое давление в верховой призме с каменной пригрузкой после землетрясения и его рассеивание

ствования избыточного порового давления в верховой призме плотины при землетрясении.

Исследования были проведены при коэффициенте фильтрации в призме, равном  $1,15 \cdot 10^{-2}$  см/с (10 м/сут). Расчеты показали, что при сейсмическом воздействии в верховой призме плотины (т. А) повышение порового давления происходит почти на 80 кПа, что превышает гидростатическое давление в призме на 15 % (рис. 4).

Рассеивание порового давления происходит с затухающей скоростью: за первые сутки поровое давление снижается на 3,5 м вод. ст., через трое суток — на 6 м вод. ст. Продолжив эту экспоненту можно прогнозировать практически полное рассеивание порового давления в призме только к концу 10-х суток.

Для дополнительного исследования появления и рассеивания порового давления в верховой призме плотины был рассмотрен тест со 100-метровой каменно-земляной плотиной и аналогичным сейсмическим воздействием. В тесте были рассмотрены грунты верховой призмы разной водопроницаемости — от песчаных с  $K_{\phi} = 1 \cdot 10^{-4}$  см/с до гравийного материала с  $K_{\phi} = 10$  см/с. На рис. 5 показаны эпюры порового давления в 100-метровой плотине с гравийно-галечниковым грунтом в призме с  $K_{\phi} = 1,10 - 2$  см/с. Максимальное превышение порового давления в призме составило 4 м вод. ст. (т. А).

По результатам расчетов построен график изменения максимальных величин порового давления в призме плотины (т. А) при различных значениях коэффициентов фильтрации призмы (рис. 6). Три расположенных один под другим графика показывают скорость рассеивания порового давления в верховой призме. Согласно полученному графику в песчаных плотинах величина избыточного порового давления очень существенна, она составляет почти треть гидростатического давления в верховой приз-

ме. Взвешивающее действие избыточного порового давления, несомненно, должно сказаться на устойчивости откосов верховой призмы за счет уменьшения сил собственного веса грунта. К тому же рассеивание порового давления даже в гравелистом грунте происходит не за секунды, как часто отмечается, а в течение нескольких суток. Эти обстоятельства говорят о необходимости учета порового давления в расчетах устойчивости откосов высоких грунтовых сооружений при сейсмических нагрузках.

Проведенные исследования влияния порового давления на прочность и устойчивость каменно-земляных плотин показали, что при землетрясении рост порового давления происходит мгновенно после первых сейсмических толчков, при этом снижения порового давления не происходит в силу кратковременности сейсмических импульсов. Наличие сдвигающей силы и снижение сил собственного веса за счет взвешивающего действия порового давления приводят к повсеместному увеличению в плотине сдвиговых деформаций. В тех зонах плотины, где шаровой тензор деформаций превалирует над девиаторным (внутренние зоны плотины), эффект от учета порового давления приводит к незначительному снижению показателей прочности грунта.

Наибольшую опасность представляют внутренние области плотины, где поровое давление максимально. Как правило, это область верховой переходной зоны, примыкающая к основанию со стороны напорной грани ядра. Иногда в целях экономии материалов обратного фильтра здесь устраивают однослойную переходную зону. Однако именно здесь формируется область предельного состояния, приводящая к образованию внутренних и контактных (по основанию) трещин. Другой “опасной” зоной является весь массив верховой призмы, особенно если она выполнена из грунтов с понижен-

ным коэффициентом фильтрации (гравийно-галечниковые и гравийно-песчаные смеси). Резкое и значительное повышение порового давления в этой зоне может привести к нарушению устойчивости откоса по глубокой поверхности обрушения. В целях недопущения таких явлений можно рекомендовать устройство каменной пригрузки с высоким коэффициентом фильтрации, как это сделано на Нурекской плотине, или внутренних дренажных слоев, как на плотине Шимен (о. Тайвань). Возможны комбинированные решения. При проектировании каменно-земляных плотин с верховыми призмами, выполненными из материала с  $K_f$  более 100 м/сут (0,1 см/с), значительного порового давления не возникает.

Для демонстрации эффекта снижения избыточно порового давления в призме с дренажной конструкцией был проведен расчет той же 100-метровой плотины, но имеющей пригрузку камнем вдоль верхового откоса. Толщина пригрузки по основанию 20 м. Расчет показал снижение максимального порового давления в призме с 4 до 3,2 м вод. ст. (рис. 7). Рассеивание порового давления также происходит ускоренными темпами по сравнению с предыдущей задачей.

Таким образом, отсыпка каменной пригрузки на верховом откосе кроме антисейсмического эффекта имеет и дренажный эффект, приводящий к снижению избыточного порового давления в призме. По-видимому, использование каменной пригрузки совместно с внутренними дренажными лентами в высоких и сверхвысоких плотинах позволит повысить устойчивость плотины к сейсмическим нагрузкам.

#### Список литературы

1. *Гидротехнические сооружения: Учебник для вузов / Под ред. Л. Н. Рассказова.* — М.: АСВ, 2008. С. 388 – 402.
2. *Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н.* Проектирование грунтовых плотин. — 2-е изд. — М.: АСВ, 2001. С. 184 – 200.
3. *Мельник В. Г.* Исследование возможности возникновения порового давления в крупнообломочных грунтах при динамических воздействиях // Тр. лаборатории ГС ВОДГЕО. 1969. № 5. с. 133 – 145.
4. *Ничипорович А. А., Цыбульник Т. И.* Натурные и расчетные данные по распределению порового давления в ядре высокой гравийно-земляной плотины // Тр. лаборатории ГС ВОДГЕО. 1974. Вып. 44. с. 1 – 6.
5. *OC Zienkiewicz.* Computational geomechanics with special reference to earthquake engineering // John Wiley and Sons Ltd. 1999.

### ***ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!***

*Сведения о переводе на английский язык статей из журнала «Гидротехническое строительство» можно получить в редакции по телефону (495)741-49-81.*

*По вопросам выплаты авторского гонорара за переведенные статьи обращайтесь в отдел валютных расчетов Российского авторского общества (РАО) по адресу:*

*125993, Москва, ГСП-3, ул. Большая Бронная, д. 6а, комн. 225.*

*Телефоны для справок: (495)697-33-35, 697-92-88, 697-06-68.*

*Часы работы: с 9-30 до 15-30, обеденный перерыв с 12-30 до 13-30.*

# Методические основы обработки данных гидрологических измерений речных потоков на прямолинейных участках русел

Брянская Ю. В., кандидат техн. наук,

Байков В. Н., старший преподаватель (кафедра гидравлики, МГСУ),

Волынов М. А., кандидат техн. наук (ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова)

Рассмотрен вопрос о распределении скоростей и величине гидравлического сопротивления в трубах и широких каналах, а также методические вопросы определения основных гидравлических характеристик речных потоков.

**Ключевые слова:** речные потоки, скорость течения, гидравлическое сопротивление в трубах и каналах.

Гидрологические измерения речных потоков, выполняемые при решении различных задач, связанных со строительством инженерных гидротехнических сооружений, экологическим мониторингом речных систем, затоплением территорий при пропуске половодий, прогнозированием русловых деформаций и дисперсии примесей в речных потоках, требуют детальных гидрологических данных, которые могут быть получены на основе сложных и дорогостоящих экспедиционных исследований, часто затрудненных погодными-климатическими условиями, ледоходом в период весенних половодий, малыми расходами воды и малыми глубинами потока в период межени. Указанные обстоятельства приводят к необходимости совершенствовать расчетно-аналитические методы прогнозирования. Они должны основываться на исследовании универсальных гидравлических зависимостей, подобных тем, которые используются при расчетах трубопроводов. Однако, несмотря на имеющиеся попытки их создания, многие важные вопросы остаются нерешенными [1].

Прогнозирование скоростей течения, глубин речного потока, определение расхода воды, проходящего в русле при различном его наполнении, требуют использования системы универсальных зависимостей, определяющих гидравлические характеристики речных потоков в водотоках различной водности. Особенностью такой системы зависимостей является в их взаимная связанность. Так расход воды в русле можно определить на основе известных гидравлических формул (например Шези либо Дарси — Вейсбаха), их использование кроме данных о размерах и форме поперечного сечения требует сведений о сопротивлении русла и местном гидравлическом уклоне, точное установление которых вызывает значительные трудности. Даже сколько-нибудь обоснованное определение местной глубины потока при наличии внутрирусловых донных образований (рифели, дюны, гряды) представляет методические затруднения.

Наиболее важным для гидрологической практики является вопрос о гидравлическом сопротивле-

нии русла, который связан с вопросом о распределении скоростей в речном потоке, следовательно, они не могут решаться в отрыве друг от друга. Хотя понимание этой связи оформилось еще в работах Прандтля — Никурадзе [2], однако и сейчас в гидрологии делаются попытки получения формул сопротивления, не связанных с распределением скоростей [3].

Сложность этих вопросов не позволила до настоящего времени разработать строгий теоретический подход даже для потоков, имеющих сравнительно простую форму сечения (осесимметричный поток в трубе, плоский поток в широком канале), и необходимость их решения потребовала использовать ряд гипотез и постановки детальных измерений гидравлических потерь и распределения скоростей. На этой основе была создана так называемая “полуэмпирическая” теория турбулентности, подтвержденная измерениями в трубах, отдельные положения которой еще уточняются. Попытка обосновать возможность ее применения для течений в гладких и шероховатых широких каналах была предпринята А. П. Зегжда [4], который на основании собственных лабораторных экспериментов с привлечением данных других исследователей пришел к заключению об идентичности закономерностей сопротивления в трубах и широких каналах. Хотя вопросы кинематической структуры открытых потоков в исследованиях А. П. Зегжда не затрагивались, в гидравлике утвердилась точка зрения об идентичности плоских течений в широких каналах и осесимметричных течений в трубах при условии одинаковости гидравлических радиусов и шероховатости смоченного периметра этих потоков. Однако в ряде случаев такая позиция является несостоятельной и приводит к парадоксальным результатам. Так, в частности, соотношение между максимальной и средней скоростью, обычно записываемое в форме дефицита средней скорости

$$\frac{u_{\max} - V_{\text{cp}}}{u_*}, \quad (1)$$

должно быть одинаковым при идентичности течения в трубах и широких каналах, но оказывается, что оно различается в 1,5 раза, если предполагать, что распределение скоростей в трубах и каналах строго соответствует одной и той же логарифмической закономерности, которая для потоков в шероховатых границах имеет вид

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{k_s} + C, \quad (2)$$

где  $u_*$  — динамическая скорость;  $y$  — расстояние по нормали к стенке трубы (или ко дну потока);  $k_s$  — эквивалентная песочная шероховатость;  $k$  — параметр Кармана, который в трубах принимается постоянным и равным 0,4 (на основании опытов И. Никурадзе);  $C = 8,48$  — вторая константа турбулентности (на основании измерений И. Никурадзе в шероховатых трубах [5]).

Действительно, определяя среднюю скорость интегрированием формулы (2) по поперечному сечению трубы, можно установить, что:

для течения в трубе

$$\frac{u_{\max} - V_{cp}}{u_*} = \frac{1,5}{k}, \quad (3)$$

для течения в широком канале

$$\frac{u_{\max} - V_{cp}}{u_*} = \frac{1}{k}. \quad (4)$$

На парадоксальность такого различия в дефиците средней скорости для потоков в трубах и каналах при одинаковом исходном распределении скоростей указывал профессор К. В. Гришанин [1], однако он не предложил какого-либо объяснения этому феномену.

Учитывая известную связь коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  со средней скоростью потока

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{V_{cp}}{u_*}, \quad (5)$$

легко заметить, что величина  $\frac{V_{cp}}{u_*}$  может быть найдена интегрированием выражения (2):

для течения в трубе

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{V_{cp}}{u_*} = \frac{1}{\omega} \int_{\omega} \frac{u}{u_*} d\omega = \frac{1}{\omega} \int_0^{r_0} \frac{u}{u_*} 2\pi r dr, \quad (6)$$

где  $\omega$  — площадь сечения трубы;  $r$  — расстояние от оси трубы;  $r_0$  — радиус трубы;

для течения в широком канале

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{V_{cp}}{u_*} = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{u}{u_*} dh. \quad (7)$$

Очевидно, что выражения (6) и (7) в предположении идентичности распределения скоростей (2) для труб и каналов не могут обеспечить одинаковости законов сопротивления для труб и широких каналов. Вместе с тем многочисленные данные разных исследователей по сопротивлению каналов с различной формой сечения указывают на слабое влияние формы сечения на гидравлическое сопротивление [2]. Эти обстоятельства приводят к заключению о том, что зависимости, описывающие распределение скоростей при течениях в трубах и каналах, должны (при сохранении определенной общности) содержать также существенные отличия. Анализ большого числа данных по распределению скоростей в гладких и шероховатых каналах [6] показал, что логарифмический характер распределения скоростей во всех случаях подтверждается (рис. 1, а, б). Однако параметр Кармана и близок к 0,267. Полученное таким образом соотношение параметров Кармана для труб и открытых потоков разрешает упомянутый “парадокс Гришанина” и придает дефициту средней скорости для труб и открытых каналов одинаковое количественное значение. Исследование распределения скоростей для течения в пограничном слое плоской пластины (которое аналогично течению в широком канале [7]) показало, что параметр Кармана во внешней части пограничного слоя близок к 0,27. Значение параметра Кармана, близкое к 0,4, сохраняется только в сравнительно тонком пристеночном слое потока, который по этим причинам может быть назван “слоем Прандтля”.

Эта важная особенность распределения скоростей в открытых потоках с параметром Кармана  $k_n = \frac{1}{1,5} k_m = 0,267$  далее используется при анализе

кинематической структуры речных потоков, который затрудняется отсутствием сведений о величине местного уклона русла  $i$ , что препятствует прямому определению динамической скорости  $u_* = \sqrt{gRi}$ , которая при исследовании течения в трубах и лабораторных каналах устанавливается достаточно точно.

В связи с этим предлагается следующая методика определения основных гидравлических характеристик речных потоков, опирающаяся на данные гидрологических измерений скорости на вертика-

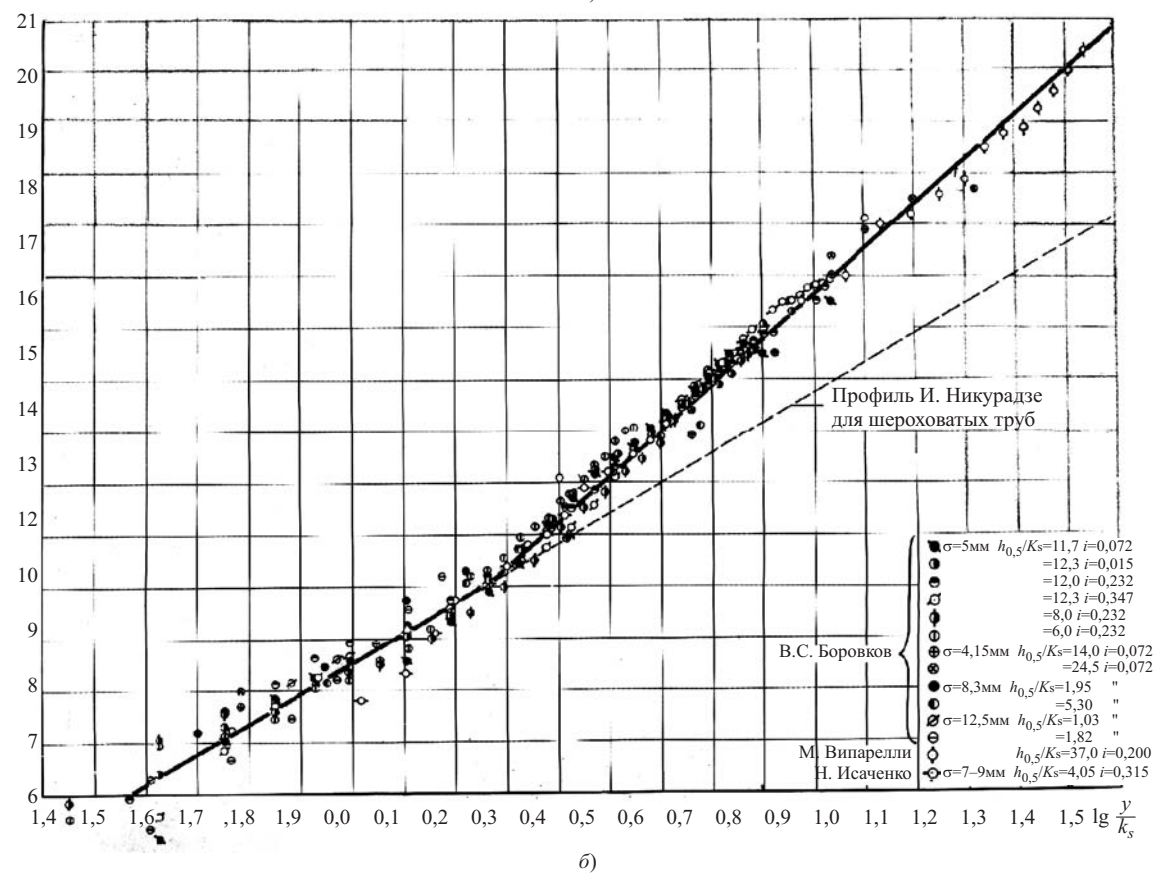
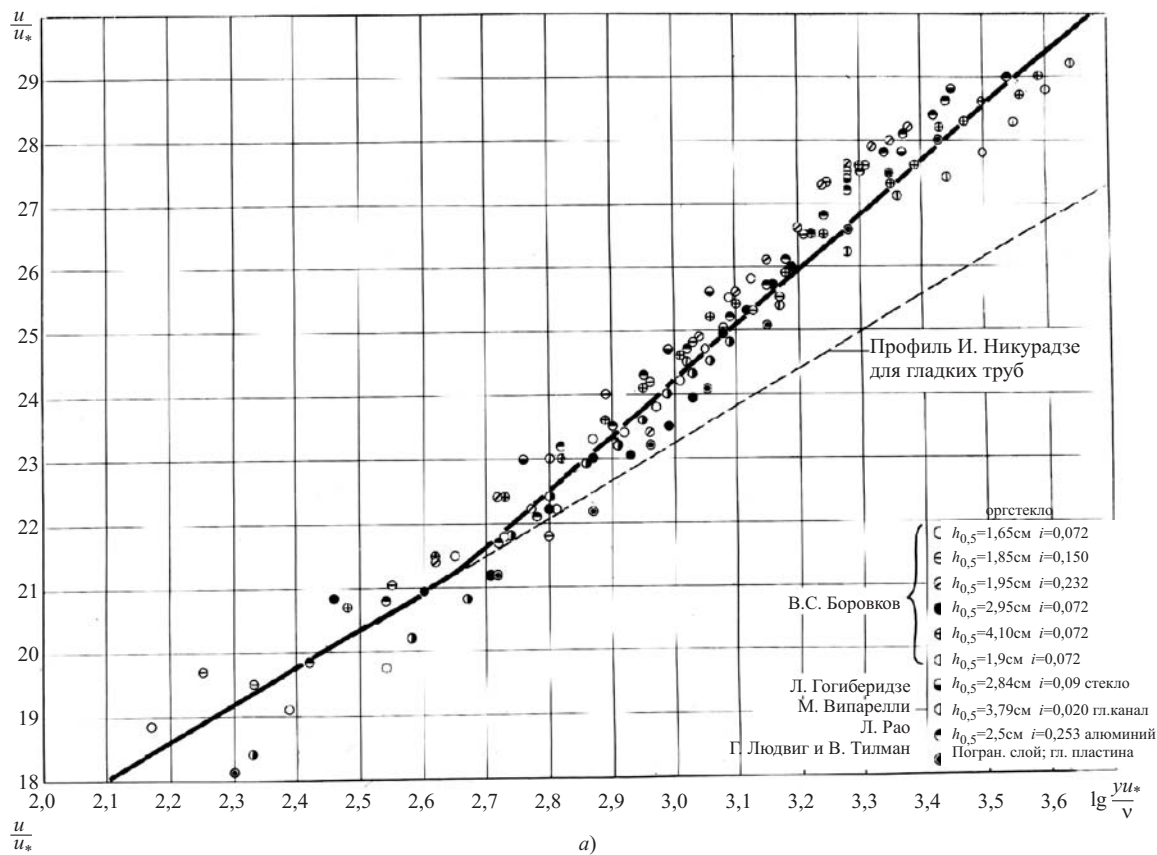


Рис. 1. Распределение скоростей в гладких (а) и шероховатых (б) каналах

лях в поперечном сечении потока и на использованные профиля (2) с параметром Кармана  $\kappa_n = 0,267$ .

Алгоритм обработки данных измерений представляется следующим образом:

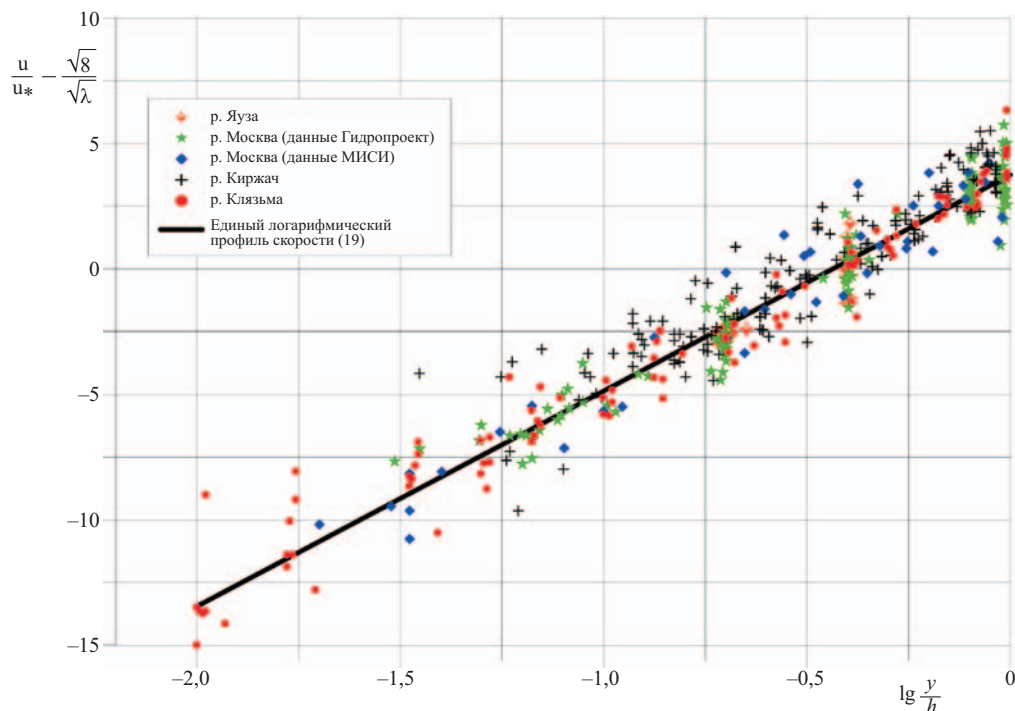


Рис. 2. Сопоставление единого логарифмического профиля скорости с данными гидрологических измерений

измеренные распределения скоростей анализируются в координатах  $u = f\left(\ln \frac{y}{h}\right)$  с нахождением уравнения линии тренда в виде

$$u = A_1 \ln \frac{y}{h} + B_1, \quad (8)$$

где  $A_1$  и  $B_1$  определяются опытным путем из (8) для каждого измеренного профиля скорости, причем  $B_1 = u_{\max}$ . Полученное уравнение линии тренда (8) сопоставляется с профилем (2), который записывается в виде

$$u = \frac{u_*}{\kappa_n} \ln \frac{y}{h} + \frac{u_*}{\kappa_n} \ln \frac{h}{k_s} + C u_*; \quad (9)$$

из сопоставления (8) и (9) находим, что  $A_1 = \frac{u_*}{\kappa_n}$ , откуда при  $\kappa_n = 0,267$  для открытого потока определяем значение местной динамической скорости.

Средняя скорость на вертикали  $V_{cp}$  может быть определена двумя независимыми способами:

численным интегрированием измеренного распределения скоростей с осреднением по глубине на вертикали;

по дефициту средней скорости (4) при  $\kappa_n = 0,267$  с учетом найденных значений  $A_1$  и  $B_1$  в уравнении линии тренда, что позволяет записать

$$V_{cp} = u_{\max} - \frac{u_*}{\kappa_n} = B_1 - A_1. \quad (10)$$

Значения средней скорости, являющейся важным параметром, найденные двумя различными способами, целесообразно представить для разных вертикалей потока в форме графика сравнения для исключения случайных ошибок.

Установленные значения средней и динамической скорости позволяют с использованием соотношения (5) найти значение местного коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$ :

$$\sqrt{\lambda} = \sqrt{8} \frac{u_*}{V_{cp}}. \quad (11)$$

Интегрированием (9) по глубине потока может быть получено следующее выражение для средней скорости:

$$\frac{V_{cp}}{u_*} = \frac{1}{\kappa_n} \ln \frac{h}{k_s} - \frac{1}{\kappa_n} + C, \quad (12)$$

откуда с использованием (5) находим

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{8}\kappa_n} \ln \frac{h}{k_s} - \frac{1}{\sqrt{8}\kappa_n} + \frac{C}{\sqrt{8}}. \quad (13)$$

Как отмечено выше, в основу настоящего анализа данных гидрологических измерений положено

предположение об идентичности законов сопротивления в трубах и широких каналах (при  $R = \frac{r_0}{2} = h$ ).

Принимая закон сопротивления И. Никурадзе для шероховатых труб

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{r_0}{k_s} + 1,74 = \frac{2}{2,3} \ln \frac{h}{k_s} + 2,34, \quad (14)$$

выражая

$$\ln \frac{h}{k_s} = \frac{1,15}{\sqrt{\lambda}} - 2,69 \quad (15)$$

и подставляя найденное выражение в (13), запишем

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{8\kappa_n}} \left( \frac{1,15}{\sqrt{\lambda}} - 2,69 \right) - \frac{1}{\sqrt{8\kappa_n}} + \frac{C}{\sqrt{8}}. \quad (16)$$

В этом выражении для каждого профиля известны все величины, кроме  $C$ :

$$C = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} - \frac{1,15}{\kappa_n \sqrt{\lambda}} + \frac{3,69}{\kappa_n}. \quad (17)$$

При известной величине  $\sqrt{\lambda}$  для профиля на вертикали с глубиной  $h$  из (15) может быть найдена величины местной эквивалентной шероховатости  $k_s$  и определена величина  $\frac{u^* k_s}{\nu}$  для подтверждения того, что рассматриваемое русло действительно “работает” в режиме квадратичного сопротивления (при  $\frac{u^* k_s}{\nu} > 50 \dots 70$  [2]) и предлагаемый подход к анализу характеристик течения и сопротивления русла правомерен.

Подставляя найденное выражение (17) для  $C$  в профиль (2), запишем

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa_n} \ln \frac{y}{h} + \frac{1}{\kappa_n} \ln \frac{h}{k_s} + \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} - \frac{1,15}{\kappa_n \sqrt{\lambda}} + \frac{3,69}{\kappa_n}. \quad (18)$$

Используя соотношение (15), получаем окончательно

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa_n} \ln \frac{y}{h} + \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} + \frac{1}{\kappa_n}. \quad (19)$$

При  $\kappa_n = 0,267$  выражение (19) принимает вид

$$\frac{u}{u^*} = 3,75 \ln \frac{y}{h} + \frac{2,82}{\sqrt{\lambda}} + 3,75. \quad (20)$$

Переход к десятичному логарифму приводит к следующему выражению:

$$\frac{u}{u^*} = 8,63 \lg \frac{y}{h} + \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} + 3,75. \quad (21)$$

Это выражение, полученное для открытых потоков, по своей структуре совпадает с единым логарифмическим профилем скорости, ранее установленным В. Н. Байковым для труб [8] при  $\kappa_n = 0,4$ :

$$\frac{u}{u^*} = 2,5 \ln \frac{y}{r_0} + \frac{2,88}{\sqrt{\lambda}} + 3,5. \quad (22)$$

Сопоставление полученного единого логарифмического распределения скоростей (19) с данными гидрологических измерений на речных потоках различной водности [9] представлено на рис. 2 в координатах

$\frac{u}{u^*} - \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = f\left(\lg \frac{y}{h}\right)$ . Приведенные на

рис. 2 профили скорости обнаруживают четкие признаки универсальности, что позволяет сделать заключение о том, что исходные положения, использованные в данном анализе ( $\kappa_n = \frac{1}{1,5} \kappa_m = 0,267$  при соответствии с законом сопротивления И. Никурадзе для шероховатых труб), не противоречат друг другу и подтверждаются данными натурных измерений распределения скоростей в речных потоках, существенно различающихся по размерам и водности.

## Список литературы

1. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. — С-Пб.: Гидрометеоздат, 1992.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969.
3. Альтикуль А. Д. Гидравлические сопротивления. — М.: Недра, 1970.
4. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. — М-Л.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1957.
5. Nikuradse I. Stromungsgesetze in ruhen Rohren Forschungheft (Forschung auf dem gebute des Ingenieurwesens). 1933. № 361.
6. Боровков В. С. Структура бурных открытых потоков: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1973.
7. Богомолов А. И., Боровков В. С., Майрановский Ф. Г. Высокоростные потоки со свободной поверхностью. — М.: Стройиздат, 1979.
8. Байков В. Н. Универсальное распределение скоростей в водных потоках при различных режимах гидравлического сопротивления // Вестник МГСУ. 2009. № 4.
9. Боровков В. С., Майрановский Ф. Г., Халабаева Т. Н. Исследование параметров речного потока и деформаций русла в паводок // Водные ресурсы. 1974. № 6.



# Потери энергии и гидравлическое трение открытого и подледного речного потока

Долгополова Е. Н., кандидат техн. наук (кафедра гидравлики, МГСУ)

Исследуются закономерности течения в открытых и подледных речных потоках. С помощью безразмерного коэффициента Дарси — Вейсбаха оценивается гидравлическое сопротивление руслового потока. Вводится коэффициент формы поперечного сечения руслового потока, позволяющий учитывать сложную форму русла при расчете гидравлического сопротивления. Полученная зависимость сопротивления от числа Рейнольдса используется при оценке отношения потерь энергии на вязкую диссипацию к полной энергии потока. Приведены результаты сравнения расчетов по модельным формулам с результатами, полученными для потоков в реках и лотках другими авторами.

**Ключевые слова:** открытые и подледные речные потоки, безразмерный коэффициент Дарси — Вейсбаха, потери энергии потока, скорость течения, гидравлическое сопротивление.

Оценка энергии среднего движения и ее потерь играет важную роль при рассмотрении речных течений. Энергия среднего движения определяет скорость течения, интенсивность процессов смешения, деформации русла и транспорт наносов. Потери энергии потока определяются гидравлическим сопротивлением открытого и подледного речного потока. Хотя уже имеется значительное число работ, в которых рассчитывается сопротивление в потоках с упрощенной формой поперечного сечения, оценка гидравлического сопротивления в русловых потоках по-прежнему остается сложной задачей из-за разнообразия геометрических характеристик русла. Задание сопротивления русла является, как правило, слабым местом при численном моделировании гидравлического режима сложных речных систем [1]. Использование коэффициента шероховатости Маннинга, применяемого в таких случаях для оценки сопротивления русла, часто оказывается неудовлетворительным из-за неоднозначности его определения.

Взаимодействие потока с руслом при заданном расходе воды и наносов определяет ширину, глубину и уклон потока [2]. Гидравлическое сопротивление потока в русле со сложной формой поперечного сечения является одним из основных факторов, определяющих равновесное или неравновесное состояние руслового потока, рассматриваемого как саморегулирующаяся система [3]. Применение формулы Шези для расчета гидравлического сопротивления рек ограничено, так как она не учитывает влияние глубины и формы поперечного сечения русла. В общем случае область сопротивления шероховатых речных русел не является автоматической, потому что прослеживается зависимость гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса, которая может быть учтена при использовании соотношения Дарси — Вейсбаха для оценки сопротивления руслового потока.

Оценка сопротивления руслового потока также осложняется разной шероховатостью отдельных участков русла, например основного русла и пойменной части. Обычно русло со сложным поперечным сечением делится на относительно большие

более или менее однородные участки [4], где основной поток отделяется от пойменного вертикальными плоскостями. Такое деление предполагает отсутствие напряжения трения на этих внутренних границах и, следовательно, исключение их из расчета величины смоченного периметра. Такое рассмотрение руслового потока предполагает отсутствие взаимодействия между областями, на которые делится поток. Однако в ряде работ, упомянутых в статье [5], исследуется течение в лотке сложной формы и указывается на существенное влияние взаимодействия турбулентных течений основного и пойменного потоков на расход всего потока в целом. При изучении турбулентной структуры течения со сложной формой поперечного сечения в лотке находится положение поверхностей нулевого напряжения трения, по которым может быть проведено деление потока на части и которые могут быть исключены из смоченного периметра, однако определение их в природном потоке очень сложно.

Оценка гидравлического сопротивления подледного потока также встречает большие трудности. Многие реки России по крайней мере полгода покрыты льдом. Зимой количество воды, поступающей в реку с водосбора, начинает уменьшаться, так как мелкие потоки и верхний слой почвы замерзают быстрее и влага с него перестает поступать в реку, т.е. уменьшаются расход воды в реке и скорость течения воды. Глубина потока текущей воды и площадь поперечного сечения потока становятся меньше. Толщина льда и шероховатость нижней поверхности льда сильно изменяются в течение зимы, следовательно, меняются гидравлическое сопротивление и пропускная способность рек [6, 7]. Толщина и шероховатость льда зависят от условий образования ледового покрова, затягивания под кромку льда шуги и отдельных льдин и примерзания этих скоплений к ледовому покрову. На участках реки, где лед прикреплен к берегам, течение можно считать напорным, там же, где наблюдаются вдольбереговые трещины, лед, лежащий на поверхности воды, также увеличивает сопротивление потока по сравнению с открытым течением.

В данной работе приводятся параметризация распределения средней скорости течения в открытых и подледных речных потоках и способ расчета коэффициента сопротивления в соотношении Дарси — Вейсбаха. Рассматриваются отношение потерь энергии к полной энергии потока, его оценка по средним параметрам потоков и зависимость от масштаба потока  $Re$ .

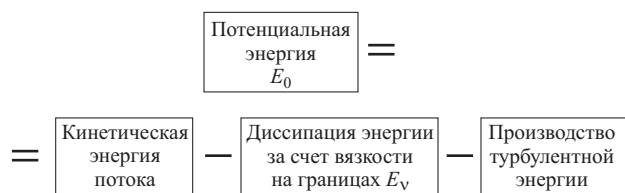
**Потери энергии среднего движения в речном потоке.** Установившийся поток в канале с постоянным уклоном непрерывно теряет потенциальную энергию. Рассмотрим поток глубиной  $h$  и шириной  $B$  в системе координат  $x, y, z$ , где ось  $x$  направлена вдоль течения, ось  $y$  — вертикально вверх ( $y = 0$  — дно), ось  $z$  — поперек течения. Выделим в потоке столб жидкости, который движется за счет уклона. Понижение центра масс этого столба высвобождает потенциальную энергию. В конечном счете эта энергия будет превращена в тепло с помощью вязкости. Приравнивая уменьшение потенциальной энергии и рост тепловой энергии, можно показать, что повышение температуры  $\Delta T$  связано с понижением центра масс  $\Delta y$  столба жидкости соотношением

$$\Delta T = \Delta y g / c_p,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $c_p$  — удельная теплоемкость воды.

Для воды  $c_p = 4200$  Дж/(кг · град) получим изменение тепловой энергии  $\Delta T = 2,3 \cdot 10^{-3} \Delta y$ . Эта оценка показывает, что  $\Delta T$ , как правило, мало. Например, для р. Киржач ( $h = 0,46$  м,  $B = 18$  м,  $V = 0,5$  м/с) на расстоянии 1 км понижение центра масс столба жидкости составляет 0,4 м и  $\Delta T \cong 0,9 \cdot 10^{-3}$  °С.

Потенциальная энергия входит в уравнение баланса средней кинетической энергии как источник:



Затем эта энергия переносится ко дну потока с помощью диффузии, где часть ее превращается в тепло посредством вязкости, а часть теряется при продукции турбулентной кинетической энергии, которая является источником в уравнении баланса турбулентной энергии. Далее эта энергия перераспределяется по каскаду вихрей с помощью диффузии перед тем, как превратиться в тепло. В уравнении баланса турбулентной энергии это превращение отражается диссипативным членом. Диссипативный член уравнения баланса турбулентной энергии и член, описывающий вязкую диссипацию

в уравнении баланса энергии среднего движения, входят в уравнение баланса тепла как источники энергии.

**Открытый поток.** Часть энергии среднего движения потока теряется за счет вязкой диссипации в тонком придонном слое, в котором составляющие тензора турбулентных напряжений очень малы. Безразмерную толщину этого подслоя можно оценить с помощью выражения  $y u_* / \nu$  [8], где  $y$  — расстояние от стенки;  $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$  — динамическая скорость;  $\tau_0$  — напряжение трения на дне;  $\rho$  — плотность жидкости;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости. В естественном потоке с шероховатым дном значение  $y u_* / \nu = 5$  обеспечивает существенное преобладание вязкого трения над турбулентным. В то же время возможны случаи, когда влияние вязкости преобладает на больших расстояниях от стенки (например, при наличии температурной стратификации), и для них нужно использовать другую оценку для толщины слоя вязкой диссипации.

Уравнение энергии среднего движения потока с постоянным уклоном имеет вид

$$u \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u^2}{2} \right) \right) - \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \mu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2,$$

где  $u$  — осредненная по времени скорость течения;  $p$  — давление;  $\mu = \nu \rho$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\mu_t$  — коэффициенты динамической, кинематической и турбулентной вязкости соответственно. Вязкая диссипация энергии в единичном слое жидкости в единицу времени может быть оценена следующим образом:

$$\mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = \tau_0 \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\rho^2 u_*^4}{\mu}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — напряжение трения на дне открытого потока.

Умножая это выражение на толщину слоя  $y = 5\nu/u_*$ , получим потери энергии  $E_v$  за счет вязкости:

$$E_v = 5\rho u_*^3. \quad (2)$$

Полная энергия потока равна

$$E_i = \int_0^h -u \frac{\partial p}{\partial x} dy = -h \langle u \rangle \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $\langle u \rangle$  — средняя по глубине скорость течения.

Из интегрального баланса сил следует, что

$$-h \frac{\partial p}{\partial x} = \tau_0. \quad (4)$$

Таким образом, отношение потерь энергии за счет вязкой диссипации к полной энергии потока равно

$$\frac{E_v}{E_i} = 5 \frac{u_*}{\langle u \rangle}. \quad (5)$$

*Подледный поток.* По сравнению с открытым потоком лед на поверхности воды создает два дополнительных источника потерь энергии: первый — за счет образования второго вязкого подслоя на нижней поверхности льда и второй — слой смешения, возникающий за счет взаимодействия пограничных слоев у дна и у льда. Многочисленные исследования структуры подледного течения показали, что для определения средних характеристик течения его можно рассматривать состоящим из двух потоков, сформированных дном и нижней поверхностью льда [2, 7, 9, 10]. Оценивая потери энергии на трение в вязком подслое на нижней поверхности льда  $E_{vi}$  так же, как для придонного потока в открытом потоке  $E_{vb}$  [5], и используя (2), получим для этих двух потоков

$$E_v = E_{vb} + E_{vi} = 5\rho(u_{*b}^3 + u_{*i}^3). \quad (6)$$

Здесь и далее для величин в придонном потоке используется индекс  $b$ , а в потоке, сформированном льдом, —  $i$ . Для того чтобы оценить значительность этого члена, сравним его со средней энергией потока:

$$E_0 = \langle u \rangle (\tau_b + \tau_i). \quad (7)$$

Используя уравнения (6), (7) и выражение для динамической скорости  $u_* = \kappa n \langle u \rangle$  [11], получим отношение потерь энергии за счет вязкости к общей энергии потока [12]:

$$\frac{E_v}{E_0} = 5 \frac{(u_{*b}^3 + u_{*i}^3)}{(u_{*b}^2 + u_{*i}^2) \langle u \rangle}. \quad (8)$$

Если лед прикреплен к берегам, то реализуется напорное течение, аналогичное течению в трубе с поперечным сечением сложной формы и переменной шероховатостью дна и нижней поверхности льда, и потери энергии подледного течения можно оценить по потерям напора. Уравнение Бернулли для установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости между двумя сечениями, в которых движение является плавно изменяющимся, имеет вид [13]

$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_f, \quad (9)$$

где  $y_1, y_2$  — высоты положения двух произвольных точек, выбранных в двух сечениях потока;  $p_1$  и  $p_2$  — давления в этих точках;  $V_1$  и  $V_2$  — средние скорости в рассматриваемых сечениях;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты кинетической энергии;  $h_f$  — потери энергии напора на рассматриваемом участке.

При описании движения жидкости уравнением (9) движение должно плавно изменяться только в рассматриваемых сечениях, на участке между сечениями движение может не быть плавно изменяющимся [13]. Потери напора  $h_f$  включают в себя потери энергии на вязкое трение на границах и на турбулентное трение в толще потока и могут быть рассчитаны по формуле

$$h_f = f \frac{L}{R} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (10)$$

где  $f$  — коэффициент гидравлического трения;  $R$  — средний гидравлический радиус;  $g$  — ускорение свободного падения;  $V$  — скорость потока, осредненная по всему участку.

Таким образом, для оценки потерь энергии в открытом и подледном речных течениях по (5), (8) и (10) необходимо знать профиль средней скорости, динамическую скорость и гидравлическое сопротивление потоков.

**Профиль средней скорости открытого и подледного потоков.** В общем случае, исходя из теории размерностей, профиль скорости потока может быть описан выражением [14]

$$\frac{y}{u_*} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = \left( \frac{u_* y}{\nu} \right)^n f(\text{Re}), \quad (11)$$

где  $\text{Re}_* = u_* h / \nu$  — глобальное число Рейнольдса;  $n$  — показатель степени, зависящий от  $\text{Re}_*$ .

Интегрирование (11) в предположении полной автомодельности потока приводит к универсальному логарифмическому профилю скорости. При неполной автомодельности —  $n \neq 0, f \neq \text{const}$  — получаем степенной профиль средней скорости с показателем степени, зависящим от  $\text{Re}_*$ . Анализ результатов измерений профиля скорости в открытых потоках [13, 15, 16, 17, 18] позволяет считать степенной закон с переменным показателем степени не уступающим в точности и теоретической обоснованности логарифмическому и использовать для описания распределения средней скорости по глубине рек. Гипотеза о неполной автомодельности сдвигового потока по числу Рейнольдса подтверждается также в работе [19], где высказывается со-

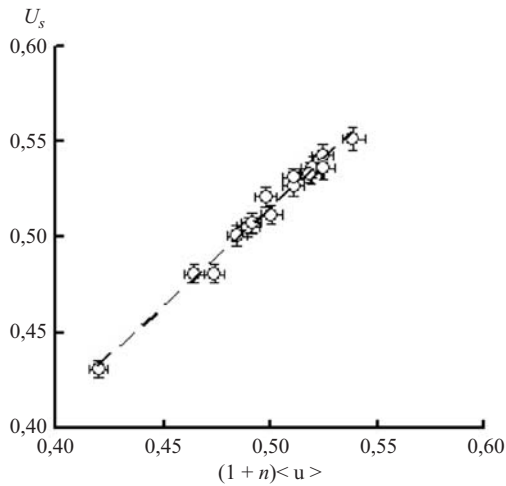


Рис. 1. Значения  $u_s$  в формуле (12), полученные по измеренным профилям скорости и рассчитанные по  $u_s = (1+n)\langle u \rangle$

ображение о том, что распределение скорости в речном течении должно описываться степенным законом с показателем степени, зависящим от числа  $Re$ .

Для описания распределения скорости по глубине реки используем степенной закон в виде

$$u = u_s \left( \frac{y}{h} \right)^n. \quad (12)$$

Интегрируя (12) по глубине, получим значение параметра  $u_s = (1+n)\langle u \rangle$ , где  $\langle u \rangle$  — средняя по глубине скорость течения:

$$u = (1+n)\langle u \rangle \left( \frac{y}{h} \right)^n. \quad (13)$$

Возможность такого представления  $u_s$  подтверждается результатами измерений профилей средней скорости потока в р. Киржач [5], представленными на рис. 1. Для течений в равнинных реках показатель степени в (13) изменяется в сравнительно небольших пределах —  $0,1 < n < 0,3$  в зависимости от  $Re$ . Отсутствие особой точки на дне потока, где  $u = 0$ , делает степенной закон более удобным при описании распределения скорости по глубине реки.

Показатель степени  $n$  в (13) — один из наиболее легко и надежно измеряемых параметров в речном потоке, величина которого связана с гидравлическим трением в потоке, а форма профиля скорости является результатом взаимодействия потока и русла. Если считать  $n$  переменной функцией числа  $Re$ , то он является параметром, наиболее точно отражающим трение в реке.

В подледном потоке появляется второй пограничный слой на нижней поверхности льда и профиль скорости становится более сложным. Ранее считалось, что при двухслойном описании подлед-

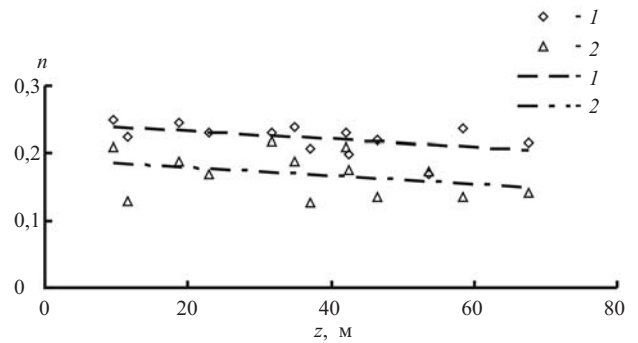


Рис. 2. Изменение показателей степени  $n_b$  (1) и  $n_i$  (2) в формуле (14) по ширине р. Москвы, рассчитанных по измеренным профилям средней скорости

ного потока граница между этими потоками проходит по линии максимальной средней скорости. Как отмечено в [2], и логарифмический и степенной законы, которыми описывается распределение средней скорости по глубине потока, не дают нулевых градиентов скорости в точке, где скорость максимальна. Если в первом приближении пренебречь разрывом производной скорости на границе сопряжения нижнего и верхнего потоков в подледном течении и описать профиль скорости в каждом из них степенным законом с показателями степени  $n_b$  и  $n_i$ , характеризующими соответственно шероховатости дна и нижней поверхности льда, то получим

$$u_b = u_{sb} \left( \frac{y}{h_b} \right)^{n_b}, \quad u_i = u_{si} \left( \frac{y}{h_i} \right)^{n_i}, \quad (14)$$

где  $u_{sb}$ ,  $u_{si}$  — условные поверхностные скорости для рассматриваемых потоков.

При таком подходе возникает вопрос о делении подледного течения на придонный и сформированный нижней поверхностью льда. Этот вопрос подробно обсуждается в работах [7, 20]. Полученные экспериментально распределения средней скорости характеризуются значительным участком с градиентом скорости, близким к нулю. Подобные профили получены при моделировании подледного течения в лотке [21]. Наличие слоя с одинаковыми скоростями при сопряжении нижнего и верхнего потоков объясняется формированием слоя смешения между этими двумя потоками [20]. Представление распределений скорости подледного потока выражением (14) позволяет проводить процедуру сшивки профилей скорости двух потоков и рассчитывать их средние параметры. Применение предлагаемого способа описания подледного течения к потоку в р. Москве [7] и расчет средних характеристик течения (рис. 2) показали адекватность его использования при расчетах.

**Динамическая скорость потока.** Для стационарного открытого течения динамическая скорость  $u^*$  может быть определена с помощью измерений

уклона свободной поверхности воды или по измеренному профилю средней скорости. Первый метод требует точных измерений уклона водной поверхности и дает величину динамической скорости, среднюю для значительного участка реки, на котором измерялся уклон. Точные измерения уклона водной поверхности природного потока, как правило, трудно выполнимы. Значения динамической скорости для конкретных сечений реки можно рассчитать по профилям средней скорости, пользуясь выражением [11]

$$u_* = \kappa n \langle u \rangle. \quad (15)$$

Результаты сравнения расчета  $u_*$  с помощью логарифмического и степенного законов показали хорошее совпадение значений  $u_*$ , вычисленных обоими методами [5], и доказали правомерность использования выражения (15) для расчета динамической скорости на данной вертикали.

По измерениям профилей в нескольких створах реки можно рассчитать величину  $u_*$ , среднюю для сечения, а потом для участка реки и, при наличии данных об уклоне водной поверхности  $i$ , сравнить со значением динамической скорости, рассчитанной по уклону  $u_* = \sqrt{gHi}$ . Такое сравнение, проведенное по результатам измерений на р. Киржач [5], показало удовлетворительное согласие. Осредненная по участку реки длиной 40 м динамическая скорость  $u_*$ , вычисленная с помощью степенного закона, равна  $\langle u_* \rangle = 3,05$  см/с, а значение  $u_*$ , рассчитанное по уклону, равно  $\langle u_* \rangle = 3,2$  см/с, причем измерения уклона проводились на участке 120 м.

При представлении подледного течения двухслойным потоком динамические скорости для каждого из них рассчитываются по формуле (15), справедливой для открытых потоков [7].

**Гидравлическое сопротивление.** При рассмотрении коэффициента сопротивления для открытого потока главной задачей является нахождение связи между скоростью потока и потерями напора. Эта связь, как правило, описывается формулами Шези или Дарси — Вейсбаха, причем первая обычно используется для открытых течений, а вторая — для течений в трубах. На преимущества использования коэффициента Дарси — Вейсбаха при оценке сопротивления и на его более ясный физический смысл указывают авторы многих работ, например [2, 4, 11, 13, 15]. Формула Дарси — Вейсбаха является более строгой и содержит безразмерный коэффициент трения  $f$ , в отличие от размерного коэффициента Шези. В данной работе для расчета сопротивления открытого потока используется коэффициент Дарси — Вейсбаха, который связан с напряжением трения на дне руслового потока.

*Напряжение трения и форма поперечного сечения открытого потока.* Среднее по сечению тре-

ние на дне может быть выражено через уклон водной поверхности потока при определенном перепаде давления  $\Delta p$  [11]

$$\overline{\tau}_0 = \frac{\Delta p R}{l} = \rho g i R, \quad (16)$$

где  $R = A/P$  — гидравлический радиус;  $A = \int_0^B h(z) dz$  — площадь живого сечения;  $l$  — длина участка;  $P$  — длина смоченного периметра.

Перепад давлений на участке потока  $l$  равен

$$\Delta p = \rho f \frac{\overline{V}^2}{2} \cdot \frac{l}{h_0}, \quad (17)$$

где  $\overline{V}^2 = \frac{1}{A} \int_A u^2 dA$  — средний по сечению квадрат скорости течения;  $h_0$  — характерный размер потока;  $f$  — коэффициент гидравлического сопротивления Дарси — Вейсбаха.

Тогда для коэффициента Дарси получим

$$f = 2 \frac{u_*^2}{V^2} \frac{h_0}{R}. \quad (18)$$

Выражение (18), являющееся определением коэффициента сопротивления  $f$ , получено в работе [13] с помощью теории размерности. В (18) можно выделить коэффициент  $m$ , зависящий только от геометрических параметров русла реки:

$$m = 2 \frac{h_0}{R}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (18) получим

$$f = m \frac{u_*^2}{V^2}, \quad (20)$$

где  $m$  — коэффициент формы поперечного сечения реки.

Для круглой трубы, характерным размером которой является диаметр  $h_0 = d = 4R$ , получим привычное значение  $m = 8$ . Для открытого плоского потока при  $h/B < 1$  характерным размером является глубина  $h_0 = h = R$  и тогда  $m = 2$ . Для расчета коэффициента формы русла  $m$  можно также рассчитать с помощью выражения

$$m = 2 \frac{P}{B}. \quad (21)$$

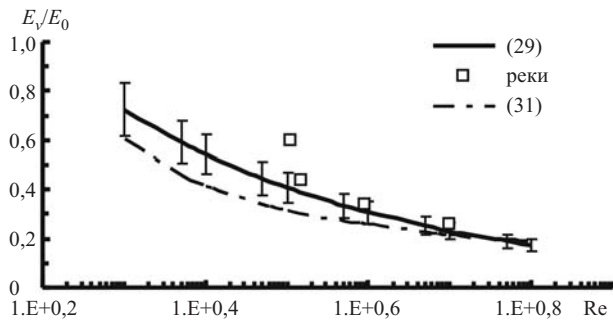


Рис. 3. Зависимость  $E_v/E_0$  от  $Re$ : сплошная кривая — решение уравнения (29); значки — расчет значений  $E_v/E_0$  для потоков в реках с растущим числом  $Re$  (Полометь, Киржач, Москва, Волга); штрих-пунктирная кривая — расчет  $E_v/E_0$  по формуле (31) для модели [28]

Для большинства равнинных рек условие  $h/B < 1$  выполняется, и, считая их плоскими потоками, при расчете  $f$  можно использовать  $m = 2$ , что подтверждается данными табл. 1, где приводятся характеристики открытых и подледных потоков в реках и лотках разных масштабов и рассчитанный коэффициент формы русла ( $\langle B \rangle$  и  $\langle h \rangle$  — средние по участку значения ширины и глубины рек).

Исследования зависимости касательного напряжения от глубины подледных потоков показали, что его можно считать изменяющимся линейно в каждом из потоков, прилегающих ко льду и дну

Таблица 1

Параметры сечений и коэффициент формы русла для разных потоков

Объект	$\langle h \rangle / \langle B \rangle$	$m$
Открытый поток		
Р. Киржач, $\langle B \rangle = 18$ м, $\langle h \rangle = 0,46$ м	0,026	2,02 – 2,07
Р. Москва, лето, $\langle B \rangle = 74$ м, $\langle h \rangle = 1,8$ м	0,024	2,01
Р. Волга	0,005	2,00
Лоток [15]	0,017	2,03
Лоток [22]	0,007	2,03
Лоток [4]	0,02	2,04
Подледный поток		
Лоток [21]	0,22	5,00
Р. Слейв [23]	0,056	3,8 – 4,2
Р. Москва, зима, $\langle B \rangle = 62$ м, $\langle h \rangle = 1,4$ м	0,023	3,9
Р. Нидельва [24]	0,032	3,8
Р. Висла [25]	0,007	3,9

[21]. Тогда для описания напряжения трения по глубине каждого из потоков независимо можно использовать выражения (7) и (9) соответственно [7]:

$$\tau_b = u_{*b}^2 \left(1 - \frac{y}{h_b}\right), \quad \tau_i = u_{*i}^2 \left(1 - \frac{y}{h_i}\right). \quad (22)$$

Пользуясь выражением для суммарного напряжения трения  $\tau_0$ , которое на боковой поверхности подледного потока составляет  $\tau_0 = \tau_b + \tau_i$  [9], получим для коэффициента гидравлического трения подледного потока следующую формулу [7]:

$$f = m_i \frac{(u_{*b}^2 + u_{*i}^2)}{V^2}, \quad (23)$$

где  $\overline{V^2}$  — средний по сечению квадрат скорости подледного течения;  $u_{*b}$ ,  $u_{*i}$  — динамические скорости потоков, сформированных дном и нижней поверхностью льда;  $m_i$  — коэффициент формы русла подледного потока, аналогичный (21)

$$m = 2(P_b + P_i)/B, \quad (24)$$

где  $P_b$  и  $P_i$  — длина смоченного периметра дна и нижней поверхности льда.

Значения коэффициентов формы русла, рассчитанные по (21) и (24) для разных рек, представленные в табл. 1, подтверждают возможность использования  $m = 2$  и  $m = 4$  для расчета гидравлического сопротивления натуральных открытых и подледных потоков. Если поток узкий и глубокий, т.е. условие  $h/B < 1$  не выполняется, то коэффициент формы  $m$  можно вычислить с помощью выражений (21) и (24): он будет иметь значение в диапазоне от 2 до 8.

*Коэффициент Дарси — Вейсбаха для открытого потока.* Пользуясь выражением (15) и заменяя  $V^2$  в (18), для коэффициента трения в открытом русловом потоке получим

$$\sqrt{f} = \sqrt{m} \kappa n, \quad (25)$$

причем при расчете  $f$  для данной вертикали по (18) замена  $V^2$  на  $\langle u \rangle^2$  дает погрешность порядка  $n^2$ . Для плоских речных потоков

$$f = 0,32n^2. \quad (26)$$

Результаты расчета коэффициента трения по (20) и (26) для рек, описанных в [5, 26], представлены в табл. 2. Для всех рассматриваемых рек отношения  $h/B < 0,03$ , следовательно, коэффициент формы русла можно считать равным 2 и использовать выражение (26) для расчета  $f$ . Показатели сте-

пени вычислялись по измеренным профилям скорости потока. Коэффициенты трения Дарси — Вейсбаха, полученные по формуле (26), представляют собой средние величины по сечению реки или по нескольким сечениям при наличии данных измерений. При наличии надежных измерений уклона для определения  $u_*$  сравнение результатов расчета  $f$  по (26) и (20) показало хорошее согласие. Полученная по результатам измерений скорости на разных реках (табл. 2) зависимость  $f(\text{Re})$  имеет вид

$$\lg f = -0,25 \lg \text{Re} - 0,63. \quad (27)$$

**Подледный поток.** Как отмечено выше, в плоском подледном потоке  $m = 4$  при  $h/B < 1$ . Для потоков, которые нельзя считать плоскими, значения  $m$ , вычисленные по (24), находятся в диапазоне между значениями коэффициента для плоского потока и для круглой трубы 4 – 8. Вклад  $m$  в гидравлическое трение течения подо льдом увеличивается по сравнению с потоками, которые можно считать плоскими. Значение коэффициента гидравлического трения, среднего по участку подледного течения в р. Москве, рассчитанное по (23), согласуется со значениями гидравлического сопротивления для труб прямоугольного сечения при  $\text{Re} \sim 10^6$  [8] и результатами численного моделирования течения подо льдом в лотке [27].

Коэффициент гидравлического трения, рассчитанный по средним характеристикам потока на участке измерений  $l$ , равен  $f = 0,064$  ( $\bar{R} = 0,576$ ,  $\bar{V} = 0,39 = 0,39$  м/с) и тогда по (10) получим  $h_{f0} = 1,03$  м. Оценка потерь напора на участке измерений по величине среднего уклона р. Москвы  $i = 0,7$  ‰, приведенной в [12], дает  $h_{f0} = 0,826$  м. Увеличение потерь  $h_{f0}$ , рассчитанных по (10), по сравнению с оценкой, полученной по среднему уклону, обусловлено выпуском теплых вод у правого берега в одном из сечений, вызвавшем увеличение шероховатости нижней поверхности льда и, как следствие, увеличение  $f$  в этом сечении [12].

**Потери энергии.** Модельные соотношения, полученные выше, дают возможность рассчитать отношение динамической и средней по вертикали скорости течения в формуле (5) для плоского потока:

$$\frac{u_*}{\langle u \rangle} = \sqrt{\frac{f}{2}}. \quad (28)$$

Тогда отношение (5) имеет вид

$$\frac{E_v}{E_0} = 5\sqrt{\frac{f}{2}}. \quad (29)$$

Если использовать оценку гидравлического сопротивления для развитых открытых турбулентных

течений  $f \sim 10^{-2}$  [28], то отношение потерь энергии за счет вязкости к полной энергии речного потока по (5) при  $m = 2$  имеет вид

$$\frac{E_v}{E_0} \approx 0,35. \quad (30)$$

Для диапазона изменения показателя степени в равнинных реках  $n = 0,1 \dots 0,3$  при  $k = 0,4$  получим вместо оценки (28) диапазон изменения  $E_v/E_0 = 0,2 \dots 0,6$ .

Воспользовавшись выражением для (29) и зависимостью (27), получим отношение потерь энергии за счет вязкости к полной энергии потока как функцию числа Рейнольдса (рис. 3). На рис. 3 представлена также зависимость  $E_v/E_0 = f(\text{Re})$ , полученная экспериментально в [28] при моделировании русел с простой формой поперечного сечения в лотке:

$$\frac{E_v}{E_0} = 8,7\sqrt{\frac{f}{8}}, \quad (31)$$

где  $f$  является решением неявного уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,03 \lg \left( \frac{\text{Re} \sqrt{f}}{3,41} \right). \quad (32)$$

Как видно из рис. 3, зависимости  $E_v/E_0 = f(\text{Re})$ , полученные с помощью выражения для гидравлического сопротивления (27) для рек и выражения для лотков (32) [28], близки. Зависимость (29), полученная для рек, близка к приведенной в [28], и результаты расчета для рек Киржач, Москва и Волга хорошо с ней согласуются. В обеих зависимостях (29) и (31) отсутствует член, учитывающий отношение донной шероховатости к глубине. Этим объясняется заметное отклонение значения

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты Дарси — Вейсбаха, рассчитанные с помощью формул (20) и (26)

Река	Re	$f$ по (26)	$f$ по (20)
Киржач (1972)	$2 \cdot 10^5$	0,011	-
Киржач (1974)	$3 \cdot 10^5$	0,011	0,012
Atrisco canal [26]	$4 \cdot 10^5$	0,009	0,011
Москва	$9 \cdot 10^5$	0,007	-
Missouri [26]	$6 \cdot 10^6$	0,006	0,006
Волга	$1 \cdot 10^7$	0,004	-
Mississippi [26]	$3 \cdot 10^7$	0,003	0,003

$E_v/E_0$  для  $p$ . Полометь, где активные русловые деформации вызывают формирование песчаных форм больших размеров по сравнению с глубиной реки. Дно этой реки на участке измерений покрыто песчаными грядами [29] длиной  $l \cong 1$  м и высотой  $h_w \cong 0,1$  м, а средняя на участке измерений глубина  $\langle h \rangle = 0,4$  м, т.е. в данном случае  $h_w/\langle h \rangle = 0,25$ . Высота песчаных рифелей на участках измерений в реках Москве (летом) и Киржач и относительная шероховатость равны соответственно:  $h_w \cong 0,15$  м;  $h_w/\langle h \rangle = 0,08$  и  $h_w \cong 0,02$  м,  $h_w/\langle h \rangle = 0,04$ . В результате исследования рельефа дна протоки Дубовской (р. Волга,  $H \cong 10$  м) с помощью эхолота получено среднее значение высоты песчаных волн  $h_w \cong 1$  м на дне протоки Дубовской и отношение  $h_w/\langle h \rangle = 0,1$ . Чем больше  $Re$ , т.е. масштаб потока, тем меньшую долю составляет потеря энергии за счет вязкой диссипации от энергии среднего движения. Эта доля растет также с увеличением отношения размера шероховатости к глубине потока. Для малых рек с активным русловым процессом (например, р. Полометь) или каменистым дном — р. Нидельва [30] зависимость (5), по-видимому, занижает долю энергии среднего движения, диссипирующей за счет вязкости.

Сравнение оценок величины  $E_v/E_0$  (8) для открытого потока в течении подо льдом в р. Москве дает увеличение  $E_v/E_0$  для подледного потока примерно на 10 %.

## Выводы

Исследования структуры открытых и подледных течений в реках показали, что их можно считать плоскими потоками. На основе этих исследований предложена формула для расчета коэффициента формы поперечного сечения русла реки. Представление распределения скорости по глубине речного потока степенным законом позволяет оценить гидравлическое сопротивление потока. Анализ выражения для расчета отношения потерь энергии на вязкую диссипацию к полной энергии потока показал, что эти потери уменьшаются с ростом числа Рейнольдса. Показана необходимость учета отношения величины донных форм к глубине речного потока при оценке потерь энергии.

## Список литературы

1. *Котрехов Е. П.* Численное моделирование гидравлического режима сложных озерно-речных систем (на примере р. Вуоксы) // Водные ресурсы. 2000. т. 27. № 3.
2. *Гришанин К. В.* Гидравлическое сопротивление естественных русел. — СПб.: Гидрометеоздат, 1992.
3. *Барышников И. Б., Самусева Е. А.* Системный подход к оценке сопротивлений речных русел. — СПб.: РГГИ, 1992.
4. *Myers W. R., Brennan E. K.* Flow resistance in compound channel // J. Hydr. Res. 1990. V. 28. № 2.
5. *Долгополова Е. Н.* Коэффициент трения в русловых потоках // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 6.
6. *Козлов Д. В.* Лед пресноводных водоемов и водотоков. — М.: МГУП, 2000.
7. *Долгополова Е. Н.* Гидравлическое трение в течении подо льдом // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 6.
8. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969.
9. *Uzun M. S.* The composite roughness of ice-covered streams // J. Hydr. Res. 1975. V. 96. № 10.
10. *Shen H. T., Harden T. O.* The effect of ice cover on vertical transfer in stream channels // Water Resources Bulletin. 1978. V. 14. № 6.
11. *Орлов А. С., Долгополова Е. Н., Дебольский В. К., Губеладзе Д. О.* Распределение скоростей и гидравлическое сопротивление в русловых потоках // Водные ресурсы. 1988. № 2.
12. *Долгополова Е. Н.* Оценка энергии подледного потока // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 1.
13. *Штернлихт Д. В.* Гидравлика. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. *Баренблатт Г. И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. — Л.: Гидрометеоздат, 1982.
15. *Боровков В. С.* Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. — Л.: Гидрометеоздат, 1989.
16. *Фидман Б. А.* Турбулентность водных потоков. — Л.: Гидрометеоздат, 1991.
17. *Griffith F. O., Grimwood C. M.* Turbulence measurement study // J. Hydr. Div. ASCE. 1981. V. 107. № 3.
18. *Tsujiimoto T., Graf W. H.* Velocity distribution in a gravel bed flume // The 6-th Congress of IAHR. Kyoto, Japan. 1988.
19. *Зырянов В. Н.* Распределение энергии турбулентности в слое Стокса // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 6.
20. *Долгополова Е. Н.* Коэффициент вертикального переноса в природных потоках // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 4.
21. *Smith B. T., Ettema R.* Flow over dunes in ice-covered channel // Proc. Inter. 12-th Symposium on Ice, IAHR Trondheim, Norway. 1994. V. 1.
22. *Великанов М. А.* Динамика русловых потоков. — М.: Технико-теор. лит., 1954.
23. *Engmann J. E. O., Kellerhals R.* Transverse mixing in an ice-covered river // Water Resources Research. 1974. V. 10. № 4.
24. *Tesaker E.* River and harbour laboratory // Proc. of the 3-th Int. Symp. on Ice Problems. NH USA. 1975.
25. *Majewski W.* Flow characteristics in open channels with floating ice cover. Proc. Inter. 12-th Symposium on Ice, IAHR Trondheim, Norway. 1994. V. 1.
26. *McQuivey R. S.* Summary of turbulence data from rivers conveyance channels and laboratory flumes // Geol. Surv. Prof. Paper. 1973. № 802 B.
27. *Lau Y. L., Krishnappan B. G.* Ice cover effects on stream flows and mixing // J. Hydr. Div. 1981. V. 107. № 10.
28. *Svensson U., Andreasson P.* A mathematical simulation of energy conversions in a fully developed channel flow // J. Hydr. Res. 1989. V. 27. № 3.
29. *Долгополова Е. Н., Костюченко И. П.* Исследование спектральных характеристик скорости потока в натуральных условиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ.-Астр., 1975. № 3.
30. *Dolgopolova E. N., Tesaker E.* Turbulent structure of ice-covered flow and ice impact upon habitat in rivers // Proc 15 IAHR Ice Symp. Gdansk. Poland. 2000.