

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ.
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Աղոնջ Հ. Տ., Ալեքսեևսկի Վ. Վ., Գառապարյան Ա. Մ., Եղիազարյան Ի. Վ., Կասյան Մ. Վ., Նազարով Ա. Դ. (պատ. խմբագիր), Սիմոնով Մ. Զ., Տեր-Ստեփանյան Դ. Ի., Փինաջյան Վ. Վ. (պատ. խմբագիր տեղակալ):

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Адонц Г. Т., Алексеевский В. В., Гаспарян А. М., Егиазаров И. В., Касьян М. В., Назаров А. Г. (ответ. редактор), Пиниджян В. В. (зам. отв. редактора), Симонов М. З., Тер-Степанян Г. И.

ИВАН ВАСИЛЬЕВИЧ ЕГИАЗАРОВ

Шестого января 1963 года исполнилось 70 лет со дня рождения и 47 лет инженерной, научной и педагогической деятельности одного из крупнейших гидроэнергетиков нашей страны профессора, доктора технических наук, академика Академии наук Армянской ССР Ивана Васильевича Егиазарова.

И. В. Егиазаров является основоположником и руководителем созданной им научной школы гидроэнергетики. Многие его ученики ведут руководящую научную и производственную работу в научно-исследовательских институтах, проектных организациях и на крупных гидростанциях нашей страны.

Еще в 1909 году будучи студентом Электротехнического института (С. Петербург) Иван Васильевич проявил свои творческие способности и заинтересованность в развитии той важной науки — гидроэнергетики, — которой он посвятил всю свою жизнь и которая послужила началом его деятельности в области гидравлики, гидродинамики, инженерной гидрологии и теории гидравлического подобия и моделирования.

Выдающиеся способности И. В. Егиазарова были оценены по достоинству присуждением ему Электротехническим институтом золотой медали. Он был оставлен при институте для подготовки к научной и педагогической деятельности.

Иван Васильевич является учеником пионера строительства гидростанций нашей страны — академика Г. О. Графтио, проф. В. В. Дмитриева и проф. И. Г. Есьмана. Первая работа Ивана Васильевича по специальности «Утилизация водной энергии» была передана в печать в его студенческие годы — в 1913 году, для «Технической энциклопедии» и опубликована отдельной монографией в 1916 году. В 1917 году Иван Васильевич поступает на работу в Министерство путей сообщения, где работает по проектированию использования р. Свирь для электроснабжения Петрограда, и в 1920 году публикует две работы «Снабжение Петрограда электрической энергией» и «Снабжение Петрограда гидроэлектрической энергией со Свири и Волхова».

После Великой Октябрьской революции, открывшей перед нашей интеллигенцией широчайшие творческие возможности, он в 1920 г. участвует в составлении плана ГОЭЛРО, для которого им были разработаны вопросы связанные с электроснабжением Петрограда со Свири и Волхова, и вопросы использования водной энергии и электрификации Кавказа. В 1921—23 годах Иван Васильевич на Кавказе изучает гидроресурсы рек и в 1923 году докладывает Госплану СССР и затем публикует работы: «Потребность Кавказа в электрической энергии и использование водных ресурсов» и «Озеро Гокча (Севан) и связанные с ним вопросы использова-

ния водных сил и орошения». К этим вопросам и к дальнейшему их углублению он возвращается снова после переезда в 1943 году в Ереван.

Всестороннее и глубокое изучение вопросов, связанных с выбором мощности Волховской и Свирской гидростанций и их синхронного регулирования привело Ивана Васильевича к разработке новой идеи об использовании гидростанций руслового речного типа в качестве пиковых станций, суточных регуляторов нагрузки при совместной работе с тепловыми станциями в общей электросистеме. Метод выбора мощности, предложенный им в 1921 году, был доложен на VIII Всероссийском электротехническом съезде и получил признание, а затем и официальное утверждение. Этот метод в дальнейшем нашел свое эффективное применение при проектировании Волховской, Свирской, Днепровской и ряда других гидроэлектростанций, а также развитие и отражение в опубликованных им трудах. Педагогическую деятельность И. В. Егiazаров начал в 1916 году. С 1918 года в Электротехническом институте он читает курсы гидравлики и использования водной энергии, а в 1922 году в этом институте избирается профессором кафедры гидроэлектрических установок. В 1924 году выходит в свет первый том написанного им курса «Гидроэлектрические силовые установки» охватывающий основные вопросы в области использования водной энергии. В 1931 году выходит второй том этого курса, где даны основы энергетического и гидравлического расчета и проектирования гидроэлектрических сооружений. В 1935 году выходит вторым изданием вторая часть курса, посвященная исследованию работы водоприемных сооружений гидроэлектростанций, а в 1937 году — второе издание третьей части курса, которое охватывает вопросы, связанные с работой деривации и здания гидроэлектрической станции. Особое место в этой части курса занимает разработка теоретических задач по переходным процессам в открытых каналах и напорных тоннелях, а также в уравнительных башнях и трубопроводах гидростанции. Этот курс в течение 25 лет служил учебным пособием для электротехнических и гидротехнических ВТУЗов и факультетов нашей страны.

Являясь одним из пионеров гидроэнергетической науки и основоположником использования законов подобия и гидравлического моделирования в СССР, Иван Васильевич приложил огромные усилия к созданию в 1924 году при Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ) Гидроэлектрической лаборатории, выросшей впоследствии в крупное научно-исследовательское учреждение. Лаборатория в 1931 году вошла в состав научно-исследовательского института гидротехники имени академика Б. Е. Веденеева (ВНИИГ). Кроме специальных теоретических и экспериментальных исследований, проводившихся И. В. Егiazаровым и его многочисленными учениками и последователями в области волновых процессов, а также других вопросов гидравлики и гидромеханики, проводились исследования на пространственных моделях ряда гидроэнергетических объектов (Дзорогетская ГЭС, Севанский каскад ГЭС, Чирчикская ГЭС, Верхне-Свирская ГЭС, Земо-Авчальская ГЭС и многие другие). О достижениях советской науки в этой области И. В. Егiazаров доложил в

1935 г. на XVI Международном судоходном конгрессе и на заседаниях Международной ассоциации гидротехнического экспериментирования. В 1935 г. ВАК, на основании представления академиков Н. Н. Павловского и Б. Е. Веденеева присуждает И. В. Егiazарову ученую степень доктора технических наук без защиты диссертации. В первые годы Отечественной войны И. В. Егiazаров работал над вопросами рациональной эксплуатации деривационных и речных гидростанций и по полевым исследованиям эксплуатируемых гидростанций в Средней Азии (Чирчик, Ташкент). В период проектирования, модели гидроузлов этих станций были исследованы в Ленинградской гидроэлектрической лаборатории, причем по целому ряду сооружений Чирчикских станций Иван Васильевичем были даны и осуществлены новые решения. В частности, им была предложена система прямых промывных галерей для удаления донных наносов в головном водоприемнике. В дальнейшем натурные исследования работы таких сооружений подтвердили правильность разработанных им решений с применением гидравлического подобия.

В 1943 году И. В. Егiazаров переезжает в Советскую Армению и в конце этого года избирается действительным членом АН Армянской ССР, академиком-секретарем Отделения физико-математических, естественных и технических наук и членом Президиума Академии. В связи с образованием Академии наук Армянской ССР в ее составе был организован Водно-Энергетический институт (ВЭНИ) первым директором которого он был назначен, а в 1944 г. им организована благодаря большой помощи Партии и Правительства Ереванская Гидроэлектрическая лаборатория, явившаяся преемником Ленинградской, организованной им в 1924 г. В этом институте и лаборатории Иван Васильевич развернул большую творческую работу в области постановки и разработки ряда важных научных проблем, связанных с нуждами гидроэнергетики и гидротехники республики.

В 1946 г. после катастрофического селевого наводнения в гор. Ереване, И. В. Егiazаров возглавил работу по комплексному экспедиционному и лабораторному исследованию селевого водокаменного паводка, и в результате обобщения пришел к решению теоретической задачи о транспорте наносов водным потоком отраженных в 26 его опубликованных работах.

Надо отметить, что такое комплексное исследование проводилось впервые и оно послужило основой для корректирования ряда эмпирических формул расчета селевых паводков.

В 1951 году Иваном Васильевичем и руководимым им научным коллективом ВЭНИ была развернута сложная, большая и почетная задача по исследованию волновых явлений Куйбышевского гидроузла. Для выполнения этого задания в течение 1951 года была построена новая большая открытая Гидролаборатория в Норке, в которой в 1951 и 1952 гг. производились исследования модели Куйбышевского гидроузла. За период с 1950 по 1953 гг. в Водно-Энергетическом институте по инициативе Ивана Васильевича была начата работа по динамическому моделированию

энергосистем и исследованию взаимодействий гидравлической и электрической частей этих систем и создана первая в СССР большая лаборатория, базировавшаяся на разработанной им в 1953 г. теории моделирования гидравлического удара.

Переходя к краткой характеристике трудов Ивана Васильевича отметим, что большой цикл его работ посвящен неустановившемуся волновому движению в подпертых длинных бьефах. В этих работах дается приближенный теоретический метод расчета волновых явлений в каналах, с учетом влияния трения и уклона и без тех ограничений, которые обычно накладываются на величину излива и размаха волновых колебаний. Результаты исследования были проверены им многочисленными экспериментами в натурных условиях на больших каналах и лабораторными опытами при широком диапазоне изменения уклонов канала, и его шероховатостей. Кстати надо отметить, что при исследовании волновых явлений в судоходном канале Куйбышевского гидроузла этот метод оказался весьма эффективным благодаря своей простоте и законченности.

Особое место занимают его работы по волновому движению жидкости и, в частности, в области разработанной им точной теории моделирования гидравлического удара в напорных системах. Эта теория дает возможность моделировать сложные напорные системы и исследовать их переходные процессы и устойчивость ГЭС, работающих в энергосистеме. Почти 30 лет И. В. Егназаров работает над проблемой движения водных наносов, которая имеет большое народнохозяйственное значение. Можно отметить, что его творческие возможности в развитии теории моделирования и применения этого метода к решению практических задач с наибольшей силой снова проявились при решении последней проблемы.

Иван Васильевич является одним из основоположников теории многокомпонентных потоков как в СССР так и за рубежом. На основе теории гидравлического подобия им дано решение задачи определения расхода влекомых наносов. Получено теоретически критериальное уравнение транспорта наносов в условиях подобия и начального движения влекомых наносов. Вся задача сведена к двум критериальным комплексам, благодаря чему удалось определить вид функции и числовой коэффициент, характеризующий величину лобового сопротивления при обтекании зерен наносов. В результате получены расчетные формулы для определения расхода наносов, в зависимости от уклона или средней скорости течения потока. Развита теория подобия применительно к явлениям неустановившегося волнового движения. Предложен и обоснован метод искажения по длине линейных элементов гидросистем (каналы, тоннели) и метод комбинированного моделирования, с неискажением остальных элементов, имеющих кривизну очертаний в плане. Дана приближенная теория моделирования наносов содержащих крупные фракции, а также более мелкие фракции с определением коэффициента искажения при моделировании последних. В настоящее время И. В. работает над решением этой задачи для неоднородных по крупности наносов (смеси). За последние годы И. В. работает также над проблемой сокращения испарения воды с водной поверхности

путем нанесения на последнюю поверхностноактивных веществ, имея в виду применение этого метода на озере Севан с целью сохранения последнего в условиях близких к природным условиям. Исследования проведенные в этом направлении освещены в ряде опубликованных им статей. По его инициативе в 1960 г. Ин-т Водных проблем начал большие исследования по этому вопросу.

И. В. Егиазаров являлся участником следующих международных конгрессов, научных конференций и семинаров:

В 1926—27 годах в Германии, Франции, Италии; в 1935 году на XVI международном судоходном конгрессе в Брюсселе и по организации Международной Ассоциации гидравлических исследований (МАГИ), где являлся одним из ее учредителей, в 1947 году в Англии и Шотландии — в составе делегации Верховного Совета СССР; в 1957 году в Португалии и Франции на VII конгрессе международной ассоциации гидравлических исследований в Лиссабоне — где был избран Почетным членом Ассоциации; в 1958 году во Франции — для проведения конференции и семинаров, по гидравлическим исследованиям, в Тулузе и Париже; был избран членом-корреспондентом Французской (Тулузской) Академии наук; в 1958 и 59 годах в Чехословакии — на конференции по исследованиям транспорта наносов водным потоком. В 1962 г. избирается почетным редактором нового журнала МАГИ «Гидравлические исследования».

Перу И. В. Егиазарова принадлежат более 100 научных работ из которых 35 работ опубликованы за последние 10 лет. Список работ приводится ниже.

Наряду с научной, научно-организационной и педагогической деятельностью И. В. Егиазаров принимает активное участие в общественной и государственной жизни. С 1930 по 1935 гг. он являлся депутатом Ленинградского Совета; с 1946—50 гг. депутатом Верховного Совета СССР Второго созыва; в 1955—56 гг. депутатом Ереванского городского совета. В 1954 г. он состоял членом Центральной избирательной Комиссии по выборам в Верховный Совет СССР.

В 1957 г. И. В. Егиазаров оставил должность директора ВЭНИ в связи с переходом на пенсию и продолжает научную работу будучи членом Бюро ОТН АН Армянской ССР, членом ученых советов Института водных проблем (бывш. ВЭНИ) и Института Энергетики АН Армянской ССР, членом Совета по проблемам водного хозяйства АН СССР и членом секции водных ресурсов Комитета по координации науки Совета Министров СССР. С 1957 г. он состоит членом Севанского комитета Совета Министров Армянской ССР.

Успеху многогранной деятельности Ивана Васильевича способствовали, наряду с талантом, его исключительная организованность, принципиальность, высокая требовательность к себе и другим, а также феноменальная трудоспособность, которые так необходимы каждому научному работнику.

Научные достижения И. В. Егиазарова тесно связаны с достижениями коллективов, научных кадров Ленинградского Электротехнического ин-

ститута, ВНИИ Гидротехники, ТНИСГЭИ, Института водных проблем АН Армянской ССР, АрмНИИГИМа и Ереванского политехнического института. За долгие годы научной и научно-педагогической деятельности Иваном Васильевичем созданы многочисленные высококвалифицированные кадры докторов и кандидатов наук в области гидроэнергетики, гидравлики, гидротехники и моделирования. Особо должна быть отмечена заслуга Ивана Васильевича в воспитании квалифицированных инженерно-технических и научных кадров республики, что способствовало развитию в республике бурного гидроэнергетического строительства.

Советское правительство высоко оценило деятельность И. В. Егиазарова, наградив его в 1951 году орденом Ленина. В 1961 году Верховным Советом республики ему присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники Армянской ССР. В день юбилея, который праздновался 31 января 1963 года мы застаем его в расцвете творческих сил и энергии.

БИБЛИОГРАФИЯ ТРУДОВ АКАДЕМИКА АН АРМЯНСКОЙ ССР
И. В. ЕГИАЗАРОВА

1913 г. 1. Утилизация водяной энергии—«Техническая Энциклопедия», т. IX (отдельный оттиск из «Технической Энциклопедии», под ред. проф. Есьмана, Петроград, 1916).

1917 г. 2. Выбор водяных турбин при проектировании гидроэлектрических установок и определение расчетного напора турбины Фрэнсиса в связи с ее работой при переменном режиме журн. «Вестник инженеров», № 19—20, Петроград.

1920 г. 3. Снабжение Петрограда электрической энергией, часть 1-я. Нагрузка Петрограда и прилегающего района, Петроград.

4. Устройство воздушных линий электропередачи. Лекции, прочитанные для соединенных классов Морской Академии (литографировано).

1921 г. 5. Снабжение Петрограда гидроэлектрической энергией со Свири и Волхова. Госиздат.

6. Устройство подземных линий. Лекции соединенных классов Морской Академии (литографировано).

7. Электрический и экономический расчет воздушных линий. Лекции соединенных классов Морской Академии (литографировано).

1923 г. 8. Потребность Кавказа в электрической энергии и использование водных сил Кавказа. Тр. Госплана, кн. III, стр. 89—123, М.

9. Озеро Гокча и связанные с ним вопросы использования водных сил и орошения. Известия Научно-мелиорационного института, вып. VI, Петроград.

10. Снабжение гор. Тифлиса электрической энергией и Земо-Авчалская гидроэлектрическая станция. журн. «Электричество», № 11, Петроград—Москва.

11. Выбор мощности гидроэлектрических установок журн. «Технико-экономический вестник», № 10—11.

1924 г. 12. Гидроэлектрические силовые установки. Основные элементы использования водяной энергии. Изд. Кубуч. Л.

13. Метод определения колебаний уровня воды в длинных бьефах при регулировании, Известия НМИ, вып. VII, Ленинград.

1926 г. 14. К вопросу об измерении расходов воды в гидравлических лабораториях. Известия НМИ, вып. XI—XII, Л.

15. Гидроэлектрическая станция. Тр. ЦЭС ВСНХ СССР, Промиздат, Л., «Предварительная экспертиза проекта Днепровской гидроэлектрической станции», стр. 272—280.

16. Стоимость установки. Там же, стр. 321—336.

17. Стоимость электрической энергии. Там же, стр. 391—406.

1927 г. 18. Гидроэлектрические силовые установки в СССР и их развитие Журн. «Электричество», № 11.

1928 г. 19. Гидроэлектрические силовые установки. Основы использования водяной энергии 2-ое изд., Госиздат, М.—Л.

20. О работе по систематизации данных по гидроэлектрическим установкам, Известия НМИ, вып. XIX, 1929.

1931 г. 21. Гидроэлектрические силовые установки, част II. Гос. научно-техн. изд., М.—Л.

22. К суточному регулированию гидроэлектрических станций. Экспериментальное исследование отрицательной волны излива в длинном лотке, Известия НМИ, вып. XXIII, Л.

1932 г. 23. პილარზედგეტრიალი ძაღოვანი დანადგარება. Гидроэлектрические силовые установки, часть 1-я изд. 2-ое. Перевод на грузинский язык, Изд. Техника труд, Тбилиси.

24. Гідроелектричні силові основи використання водяної енергії. Гидроэлектрические силовые установки, часть 1-я, изд. 2-ое. Перевод на украинский язык, Техиздат, Харьков — Киев.

25. Развитие гидроэлектрических установок, Известия НИИГ, т. IV, Л.

26. Водоприемные сооружения гидроэлектрических установок. Известия НИИГ, т. IV, Л.

1933 г. 27. Гидроэлектрическая лаборатория. Описание лаборатории и ее работы. Изд. НИИГ, Л.

28. Экспериментальное исследование головных узлов и водоприемных сооружений гидроэлектрических установок на реках, несущих наносы, и работы Гидроэлектрической лаборатории по Дзорагетской, Аржарисхальской и Канакирской установкам. Известия НИИГ, т. IX, Л.

29. Гидроэлектрическая установка на реке Рион у гор. Кутаиса. Экспертиза проекта. Тр. ЦЭС, Л., вып. 17. Гидрометрия и Гидрология. Наносы и борьба с ними. Катастрофический паводок, принятый для расчета головных сооружений. Выбор расчетного расхода воды.

30. Выбор сечения деривационных сооружений. Расчеты суточного регулирования. Смета на головные сооружения, деривация до регулировочного бассейна и регулировочный бассейн (там же, стр. 217—247).

31. Напорный бассейн, холостой водосброс и трубопровод (там же, стр. 296—318, 1,5 п. л.).

32. Определение мощности и числа агрегатов Рионской станции (там же, стр. 319—324).

1934 г. 33. Гидроэлектрические силовые установки, издание 3-е, ч. I. Основы использования водной энергии. Госэнергоиздат, Л.—М., 1934.

34. Partical River Laboratory Hydraulics, Proceed. Am. Soc. Civil. Eng.

35. Суточное регулирование Волховской гидроэлектрической станции, Известия НИИГ, т. XII.

1935 г. 36. Доклад XVI Международному судоходному конгрессу об экспериментальном исследовании отрицательной и положительной волной и суточным регулированием гидростанций на англ. франц. и немецк. языках. Брюссель, 1935 г. Изд. XVI Международного судоходного конгресса.

37. Неустановившееся волновое движение в длинных бьефах. Доклад, представленный XVI Международному судоходному конгрессу в Брюсселе в 1934 г. Известия НИИГ, т. XVII, Л., 1935.

38. Гидроэлектрические силовые установки, часть II. Изд. 2-ое, ОНТИ НКТП СССР, Л.—М., 1935.

39. Etude expérimentale des têtes et ouvrages d'aménage installations hydroélectriques sur des rivières à fort débit solide, et expériences du laboratoire hydroélectrique en vue des installations hydroélectriques du Dzoraghet, Adjaris zhai et Kanakir (Bulletin de L'Association Internationale Permanente des Congres de Navigation, Bruxelles, № 19, 1935).

1936 г. 40. Обмен опытом гидротехнического экспериментирования. Журн. «Гидротехническое строительство», № 6.

41. XVI Международный судоходный конгресс и вопросы волнового движения в длинных бьефах, Журн. «Водный Транспорт», № 2.

42. Исследование волнового движения в длинных бьефах: по докладам, представленным XVI Международному судоходному конгрессу, и по работам гидроэлектрической лаборатории «Известия» НИИГ, том XIX.

1937 г. 43. Гидроэлектрические силовые установки, ч. III изд. 2-ое, ОНТИ НКТП СССР, Л.—М.

44. Неустановившееся движение в длинных бьефах. Теория, физическая картина явления, основные законы и методы расчета. Сопоставление теоретического расчета с экспериментом и натурой. Моделирование неустановившегося движения. «Известия НИИГ», т. XXI.
45. Теоретический расчет неустановившегося волнового движения в длинных бьефах и его сопоставление с экспериментом и натурой жури. «Гидротехническое строительство», № 6, стр. 36—42; № 7—8 стр. 19—25.
46. Проект технических условий и норм расчета свободной поверхности потока при неустановившемся движении в открытых длинных бьефах, сб. НИИГ, стр. 58—80.
- 1940 г. 47. Сопоставление расчетов неустановившегося волнового движения с опытами. Известия ВНИИГ, т. XXVI.
48. Научно-исследовательская работа по инженерной гидравлике, проведенная в СССР за 27 лет, и задачи, стоящие перед новой Гидроэлектрической лабораторией АН АрмССР, 1944 г. Доложено Ученому совету Водно-энергетического института в 1944 г.
- 1947 г. 49. Теория подобия и применения законов подобия к явлениям неустановившегося движения. Известия АН АрмССР, № 3.
- 1948 г. 50. Моделирование горных потоков, влекущих донные наносы. ДАН АрмССР, т. VIII, № 5.
51. Регулирование гидроагрегатов. Ереван, 1947 г. Лекции, прочитанные в Ереванском политехническом институте и в Ленинградском электротехническом институте, литографировано.
52. Гидростанции Армении, их роль в электрификации сельского хозяйства и основное направление развития производства оборудования для малых гидростанций (материалы Всесоюзной научно-технической сессии по вопросам электроэнергетического оборудования для электрификации сельского хозяйства), вып. 11.
- 1949 г. 53. Расход влекомых потоком наносов. Известия АН АрмССР, № 5.
- 1950 г. 54. Расход донных наносов. ДАН АрмССР, т. XI, № 4.
55. К определению начальной влекущей силы транспорта наносов. Уточнение уравнений расхода влекомых потоком наносов. Известия АН АрмССР, № 1.
56. Критический анализ исследований Цюрихской гидролаборатории и работ Х. А. Эйштейна, посвященных расходу влекомых потоком наносов. Известия АН АрмССР, № 3.
57. Коэффициент f начальной влекущей силы транспорта влекомых потоком наносов. ДАН АрмССР, т. XII, № 1.
58. Защита города Еревана от ливневых селевых паводков и благоустройство города. Известия АН АрмССР, № 5.
- 1951 г. 59. Гигантские гидростройки—великие стройки коммунизма. Известия АН АрмССР, № 4.
60. Расход влекомых потоком наносов. Сборник «Теория подобия и моделирование», АН СССР, стр. 274—276.
- 1952 г. 61. Гидроэлектростанции Армении и их роль в электрификации сельского хозяйства. Сб. «Вопросы электроэнергетического оборудования для электрификации сельского хозяйства». Госэнергоиздат, Л.—М.
62. Исследование волновых явлений на сооружениях Куйбышевского гидроузла. Вестник АН СССР, № 7.
- 1953 г. 63. Исследование волновых явлений в сооружениях гидроузлов на судоходных реках и методы их пространственного моделирования. Известия ОН АН СССР, 1953 г., № 2.
64. Задачи научных исследований по изучению режимов работы гидроэнергосистем и их автоматического регулирования. Известия АН Армянской ССР.
- 1955 г. 65. Моделирование гидравлического удара. ДАН СССР, т. XCI, № 3.
66. Моделирование русловых процессов. ДАН СССР, т. XCI, № 4.
67. Моделирование гидравлического удара в особых условиях динамического моделирования целой гидроэнергосистемы. ДАН СССР, т. XCI, № 5.

68. Моделирование явлений неустановившегося, волнового движения безнапорного и напорного потока. Известия ОТН АН СССР, № 10.

69. Воспоминания о деятельности академика Г. О. Графтио и совместной с ним работе. Сборник АН СССР, посвященный акад. Г. О. Графтио, стр. 75—93.

1956 г. 70. Транспортирующая способность открытых потоков. Известия ОТН АН СССР, № 2.

71. Общее уравнение предельной транспортирующей способности потока для несвязанных наносов. ДАН СССР, с. 107, № 4.

1957 г. 72. Селевой и водокаменный паводок 25 мая 1946 года на реках Гедар и Джрвеж и его комплексное изучение. Сборник «Селеные потоки и меры борьбы с ними», АН СССР.

73. Суточное регулирование при работе гидростанций в каскаде. Сб. АН Грузинской ССР.

74. К влиянию резинового шланга с воздухом при моделировании гидравлического удара. Известия ОТН АН СССР № 11, совместно с Н. А. Картвелишвили и А. А. Первозванским.

1958 г. 75. О моделировании энергосистемы и гидравлического удара. Известия ОТН АН СССР, № 10.

76. L'équation générale du transport des alluvions non cohesives par un courant fluide.

Труды 7-го конгресса Международной Ассоциации по гидравлическим исследованиям, в Лиссабоне в 1957.

77. Обмен опытом гидравлических исследований и работа лабораторий за рубежом. Труды III Гидрологического съезда 1957 г., т. V, Гидрометеониздат.

78. Обобщенное уравнение транспорта несвязанных наносов, коэффициент сопротивления размываемого русла и неразмывающая скорость. Труды III Гидрологического съезда 1957 г. т. V, Гидрометеониздат.

79. О динамических моделях энергосистем. Дискуссия. журн. «Электричество», № 5.

80. К теории моделирования гидроэнергосистем. Доклады Высшей школы. «Энергетика», № 11.

81. Modèles réduites des grands réseaux avec usines hydroélectriques et l'influence du coup de belier. „La Houille Blanche“, № 4.

82. Le développement des recherches hydrauliques en URSS. „La Houille Blanche“, № 4.

83. Capacité de transport des écoulement a surface libre „Electricité de France“, См. № 70.

84. Coefficient „f“ de la force d'entraînement critique des matériaux par charriage. Издание „Electricité de France“. См. № 57.

85. Etude sur modèle des phénomènes concernant le lit des rivières. Издание „Electricité de France“, см. № 66.

86. Débit solide dans un écoulement. Издание „Electricité de France“, см. № 52.

87. Моделирование русловых процессов. Сборник «Русловые процессы» АН СССР, 1958, стр. 154—161.

1959 г. 88. Calcul du débit solide et l'influence de la couche de grande concentration du fond. „La Houille Blanche“, № 3.

89. К решению задачи о транспорте несвязанных наносов с учетом влияния концентрации в слое придонной мутности. Изв. ОТН АН СССР. «Энергетика», № 5.

1960 г. 90. Анализ условий работы водоприемных сооружений на горных реках. Тр. АрмНИИГМ, т. V.

91. Наука о движении наносов и влияние сопредельных наук, пути развития и возможности экспериментирования. Сб. совета по проблемам водного хозяйства АН СССР, № 1.

92. К решению задачи о транспорте наносов и их моделированию. Пути развития научных исследований. Известия ОТН АН АрмССР, № 1.

93. Возможности значительной экономии водных ресурсов для народного хозяйства и одномолекулярная защитная пленка для борьбы с испарениями с поверхности водоемов, озер и водохранилищ. Известия ОТН АН АрмССР, № 3. Сообщение 1-е.

94. Возможность экономии водных ресурсов (см. п. 93) — 2-е сообщение. Изв. ОТН АН АрмССР, № 6.

1961 г. 95. Воспоминания о ГОЭЛРО и о первенцах электрификации. Юбилейный сборник «Сделаем Россию электрической», Энергоиздат.

96. Возможность экономии водных ресурсов (см. п. 93) — 3-е сообщение. Изв. ОТН АН АрмССР, № 2.

97. Движение наносов и условия работы горных низконапорных водозаборов. Тр. Всесоюзного совещания по водозаборах и русловым процессам, т. 1, Тбилиси, ВАСХНИЛ и ГрузНИИГМ.

1962 г. 98. Опыт теоретического расчета твердого стока для очень широкой по крупности смеси наносов при заданном гидрографе паводка. Сборник «Режимы и освоение водных объектов», АН СССР.

99. Водные ресурсы и борьба с потерями на испарение с поверхности водоемов. Известия ОТН АН АрмССР, № 4.

100. Моделирование наносонесущего потока и развитие научных исследований. Труды конференции по моделированию явлений в атмосфере и гидросфере. Изд. АН СССР.

101. Попытка теоретического расчета твердого стока селевого паводка на р. Гедар 1946 г. Материалы V Всесоюзного совещания по изучению селевых потоков. Баку, АН АзССР.

1963 г. 102. К истории развития Ленинградского Электротехнического Института им. Ульянова (Ленина) — 75 лет. Известия ЛЭТИ, т. 53.

103. Движение неоднородной по крупности смеси наносов. Известия ОТН АН Арм. ССР. № 2—3.

БИБЛИОГРАФИЯ СТАТЕЙ, ДОКЛАДОВ И РЕЧЕЙ И. В. ЕГИАЗАРОВА

1908. 1. Д. Н. Менделеев как общественный и государственный деятель. Сборник рефератов учащихся средних учебных заведений Кавказского учебного округа.

1912 г. 2. П. Н. Лебедев и его научные труды. Известия русского общества любителей миропведения (ИРОЛМ), 1912, № 2.

3. Оптический резонанс и цвета тел. ИРОЛМ, 1912, № 3.

1913 г. 4. Электрические колебания и волны. ИРОЛМ, 1913, № 5(1) и № 6(2).

1961 г. 5. Электрическая блок станция больницы им. Петра Великого в Петрограде (ТЭЦ). Известия АСЕА, 1916, № 1.

1935 г. 6. Техничко-экономический и энергетический анализ ДнепроГЭСа. Доклад Главэнерго (академику Б. Е. Веденсеву).

1935 г. 7. Научно-исследовательская работа по инженерной гидравлике, проведенная в СССР за 20 лет Октября. Доклад во Всес. НИИ гидротехники, в Ленинграде.

1941 г. 8. Гидромеханическое оборудование малых гидростанций. Доклад на конференции ЭНИНа АН СССР по малым гидростанциям.

9. Эксплуатация сооружений и механического оборудования деривационных гидростанций. Доклад на Всесоюзном Совещании организованном МЭС по эксплуатации гидростанций в Ленинграде.

10. Выводы Всесоюзного Совещания по эксплуатации гидростанций. Приняты на заседании 22 июня 1941 г.

1944 г. 11. Научно-исследовательская работа в СССР по инженерной гидравлике за 27 лет Октября, и задачи гидролаборатории АН АрмССР. Доклад АН АрмССР.

1945 г. 12. Научные вопросы связанные с Севано-Запгинской системой и спуском озера Севан. Доклад АН АрмССР.

13. История развития технических наук за 25 лет Советской Армении. Доклад в АН АрмССР.

1946. 14. Սովետական Հայաստանի արդյունաբերությունը. «Սովետական Հայաստան» № 5:
15. Энергетические ресурсы Армении и четвертый пятилетний план. Доклад Общему собранию АН АрмССР 22/VI—1946 г.
16. Հայկական ՍՍՌ Գիտությունների ակադեմիայի Հիդրոէլեկտրական լաբորատորիան. «Սովետական Հայաստան» 8—9:
17. Отчет о деятельности научных учреждений отделения физико-математических естественных и технических наук АН АрмССР за 1944—1946 гг. Доклад на отчетном заседании Отделения АН АрмССР.
1950. 18. Հնգամյակի զիջիարի կառուցումները
Доклад в Доме искусств.
1952. 19. Ջրաէներգետիկ ինտիտուտի գիտական նետադրույթները
Доклад в доме искусств.
1952. 20. Волго-Дон. Доклад в Доме искусств.
21. Проблема изучения режимов работы гидроэнергосистемы и ее автоматического регулирования. Доклад ученому совету Водно-Энергетического института АН АрмССР.
- 1954 г. 22. О направлении дальнейшей научно-исследовательской деятельности Водно-Энергетического института АН АрмССР. Доклад на объединенном заседании Бюро ОТН и Уч. совета ВЭНИ с участием произв. учреждений.
1955. 23. Մեր երկրի էլեկտրիֆիկացումը, «Պրոններ» № 12:
- 1956 г. 24. Мировое потребление энергии и возможное развитие использования топлива и воды. Атомные электростанции. Доклад в Обществе по распространению знаний. Ереване.
- 1961 г. 25. ЭТИ в годы Октябрьской революции, гражданской войны и интервенции.
26. ЛЭТИ в годы пятилеток до Отечественной войны.
27. План ГОЭЛРО и участие ЛЭТИ.
28. Электрические станции—тепловые электростанции—теплофикация—гидроэлектростанции. Главы юбилейного сборника к 75-летию ЛЭТИ им. Ульянова (Ленина).
29. Развитие учебной, научной и государственной деятельности ЛЭТИ по энергетике, и дальнейшие ее перспективы. Доклад 9/X—1961 г. на юбилейной конференции 75-летия ЛЭТИ.
- 1962 г. 30. Борьба с испарением воды с поверхности малых и больших водоемов. Речь на общем собрании АН Армянской ССР, 22 марта 1962 г.
- 1963 г. 31. Ответная речь на юбилее 70-летия.

РАЗВИТИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В АРМЯНСКОЙ ССР И ИСТОРИЯ ВОДНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА И ИНСТИТУТА
ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ*

Возникновение Водно-энергетического сектора Армянского филиала АН СССР и дальнейшее развитие его, после образования 29 ноября 1943 г. Академии Наук Армянской ССР и превращение сектора в Водно-энергетический Институт, было вызвано необходимостью научной разработки ряда задач, связанных с Севанской проблемой и использованием других водных ресурсов республики для целей энергетики и ирригации. Кроме того, необходимо было в составе института создать такие гидравлические лаборатории, которые были бы способны разрешать сложные научные задачи, связанные со строительством узлов Севан-Разданского каскада ГЭС. Следует отметить, что в это время в республике уже существовали мощные проектные и строительные организации, которые занимались гидротехническими объектами. Уже были построены гидростанции Дзора-ГЭС, Канакир-ГЭС и строилась подземная Озерная Севанская гидростанция и проектировалась Гюмушская ГЭС. Чувствовалась органическая необходимость в дополнении этого комплекса мощным научно-исследовательским институтом, оснащенном лабораториями.

В деле создания в Ереване института и гидравлических лабораторий, а также в формировании основной проблематики научно-исследовательских работ выдающаяся роль принадлежит первому директору института и лаборатории академику АН Армянской ССР — И. В. Егнязарову. Переброска лабораторного оборудования и измерительной техники и научного архива из созданной им в 1924 г. Ленинградской Гидроэлектрической Лаборатории в Академию Наук Армянской ССР дали возможность в течение короткого промежутка времени создать в Армении современную научно-исследовательскую базу для гидравлических исследований. Это служило большим стимулом к концентрированию вокруг нового научного центра национальных кадров гидротехников, обучению их технике и теории лабораторных исследований и решения научных проблем гидроэнергетики.

Водно-Энергетический институт (ВЭНИ) был организован постановлением Правительства АрмССР вместе с образованием Академии Наук и других входивших в её состав институтов 29 ноября 1943 г. и располагался в здании Арменэнерго.

Согласно постановлению СНК СССР от 14 апреля 1944 г. за № 5663р и постановления СНК АрмССР № 208 в 1944 г. начата организацией и

* История развития гидравлических лабораторий ЕрПИ и АрмНИИГиМ'а организованных значительно позже, здесь не излагается.

строительством Гидроэлектрическая лаборатория (ГЭЛ), в незаконченной части здания «Дома Печати».

На первых двух этажах этого здания общей площадью 1500 кв. м. были размещены лаборатории института. На третьем этаже площадью 550 кв. м. были размещены комнаты для занятий, аудитория и библиотека. Лаборатория была пущена в эксплуатацию к 1945 г. Большую помощь в проектировании строительстве и оборудовании лаборатории оказал Б. Л. Буннятян впоследствии заместитель директора. Это была первая гидравлическая лаборатория в республике, которая кроме проведения научно-исследовательских работ служила также для учебных занятий студентов Ереванского Политехнического института, где И. В. Егиазаров возглавлял кафедру использования водной энергии.

В развитии этих двух научных учреждений нужно отметить четыре этапа: I этап с 1944 по 1948 гг., когда оба учреждения работали отдельно; II этап с 1948 по 1959 гг., когда оба учреждения были слиты с выделением лаборатории промышленной и высотной электротехники, сохранив название ВЭНИ; III этап с 1959 г. когда институт был переименован в Институт Гидравлики и Энергетики в связи с близким исчерпанием использования водных ресурсов АрмССР и необходимостью развить вопросы теплоэнергетики и перспективной энергетики; IV этап с 1961 г., когда институт был переименован в Институт водных проблем (ИВП) в связи с образованием Института Энергетики и с передачей в этот институт вопросов Общей энергетики, теплоэнергетики и перспективной энергетики.

С 1957 г. директором ин-та назначен доктор тех. наук А. К. Ананян.

Первый этап развития института (1944—1948 гг.)

В состав ВЭНИ входили сектора: Водохозяйственных проблем (руководитель проф. Г. Г. Оганезов); Гидрологии (руководитель член-корреспондент АН СССР М. А. Великанов); Гидроэнергетики (руководитель член-корреспондент АН СССР В. И. Вейц, затем А. М. Осепян); Электротехники (руководитель М. М. Лебедев).

В состав ГЭЛ входили: Лаборатория гидравлики сооружения и потоков (руководитель И. В. Егиазаров); лаборатория гидроагрегатов (руководитель Г. Д. Тер-Акопов с 1947 г.); лаборатория гидроэнергосистем (руководитель И. В. Егиазаров).

Число научных сотрудников ВЭНИ и ГЭЛ составляло 24, при общем числе сотрудников 65.

За предыдущий период с 1939 по 1944 гг. Водно-Энергетическим Сектором АрмФАНа была заложена основа комплексного изучения Севанской проблемы, нашедшая отражение в 12 томах, содержащих разработку проблемы в ее первоначальном виде. На базе этой работы, уже в Водно-Энергетическом институте, под руководством проф. Г. Г. Оганезова, был написан коллективный труд: «Генеральный план комплексного использования водных ресурсов озера Севан и рек Занга (Раздан) и Аракс: «Севан—Занга—Аракс».

Эта работа отражала ту установку, которая исходила из идеи осушения Большого Севана с целью сведения до минимума потерь воды на испарение с обширной поверхности озера, что требовало слива вековых запасов озерной воды в размере 53 млрд. м³ для получения ежегодно в течение 50 лет 2,5 миллиардов киловаттчасов электрической энергии, для перехода через 50 лет к новому равновесному водному балансу озера, при котором сокращается вдвое выработка Севан-Зангинского (Разданского) каскада гидростанций, на котором отрабатывается вода, выпускаемая из озера. При этом воды Севана рассматривались основным источником орошения Араратской котловины.

Но уже в то время С. Е. Манасеряном выдвигалась идея использования, для расширения орошаемых площадей, подземных вод Араратской равнины. Эта работа нашла более полное отражение в работах института по третьему этапу.

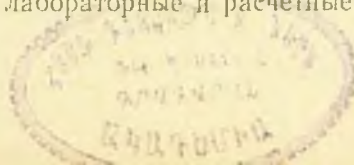
В 1946 г. под руководством И. В. Егиазарова и к. т. н. Е. Д. Сафарова была разработана схема энергетического использования ресурсов малых и средних рек для нужд электрификации сельского хозяйства республики. Вопросы потребления энергии с/х разрабатывались под рук. А. М. Осепяна.

В этой многотомной работе группой инженеров-гидротехников (М. С. Торгомяна и др.) рассмотрены все малые и средние реки в количестве 220, имеющие энергетическое значение и даны принципиальные схемы использования падения рек и перепадов на ирригационных каналах. Результаты этой работы широко использовались и используются научно-исследовательскими и проектными организациями республики (Главсельэлектро, Госплан, Арм ГИДЭП и др.).

В секторе водохозяйственных проблем составлялся кадастр родниковых вод (Г. А. Осипов), выклинивающихся в Араратской котловине. В этой работе были собраны и обобщены все данные по родникам. Результаты исследования были переданы для использования Геологическому Управлению.

После составления генерального плана комплекса «Севан—Занга—Аракс» сектор водохозяйственных проблем был преобразован и вошел в состав сектора гидроэнергетики, который вел работу в области научных обобщений материалов по Севанской проблеме, а также по вопросам роли Армянской ССР в объединенной энергосистеме Закавказья, и большую работу по энергоемким (химическим) потребителям энергии в качестве потребителей-регуляторов (А. М. Осепян).

25 мая 1946 года по руслу речки Гедар, окаймляющей с востока центральную часть г. Еревана, прошел катастрофический сель, причинивший большой ущерб городу, затопив большую территорию и завалив ее огромными камнями и прочим наносным материалом. Городской Совет Еревана обратился в ГЭЛ с просьбой провести исследование для разработки мероприятий по защите города от селевых потоков. С этой целью под непосредственным руководством И. В. Егиазарова были произведены комплексные исследования: экспедиционные, лабораторные и расчетные.



В лаборатории, в масштабе 1 : 100, была построена неискаженная модель русла р. Гедар на участке между Ботаническим садом и ул. Туманян (рис. 1). На модели были воспроизведены поперечные сечения долины с охватом горизонтов, соответствующих следам прошедшего селя, а также три модели участков Гедара с перепадами. Задача исследования заключалась в установлении по свежим следам оставленным паводком величин

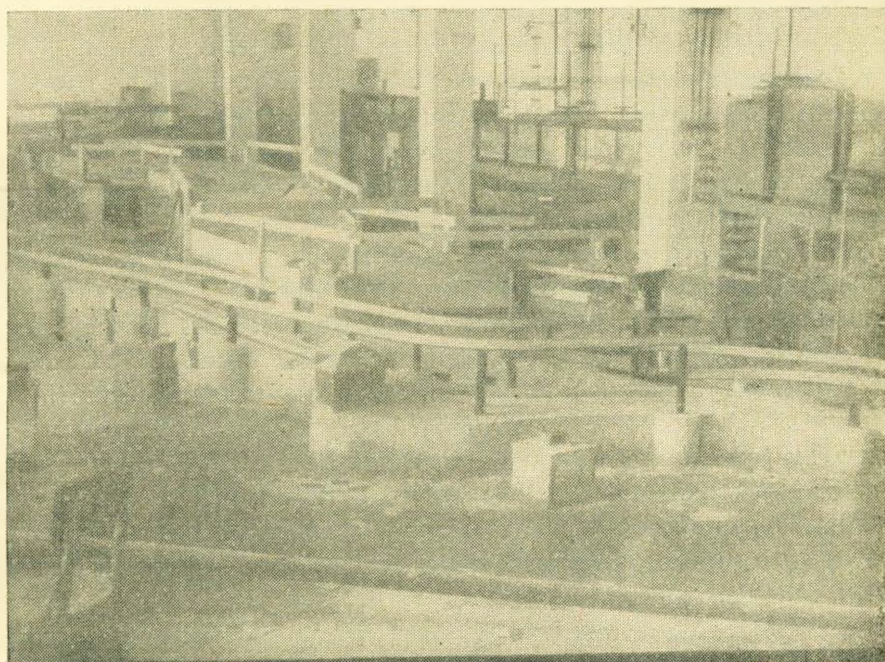


Рис. 1.

ны расхода прошедшего селевого потока и его транспортирующей способности, а также в выборе защитных мероприятий. Лабораторные исследования велись с участием научных сотрудников В. Н. Жамагорцяна и Н. Н. Геворкяна. Одновременно были организованы натурные исследования, которые велись под руководством В. И. Бек-Мармарчева при участии А. Н. Важнова и Г. Г. Вартуманяна и при консультации со стороны члена-корреспонд. АН СССР проф. М. А. Великанова; исследования по построению гидрографа селя велись И. С. Г. О. Кирицян.

В результате исследований были рекомендованы мероприятия, из которых наиболее важными являются определение расчетных расходов, необходимые для проектирования сооружений, и устройство в местах перелома профиля реки прибрежных камнеудерживающих площадок и определение сечений канализированного русла реки.

В связи с постройкой Аринджского ливнехранилища и планировавшейся фитомелиорацией не все мероприятия были осуществлены Горсоветом. В связи с этой работой был разработан метод комплексного экспедиционного, лабораторного и расчетного построения гидрографа селя и

определения максимального расхода, опубликованный в 1957 г. и метод теоретического расчета наносов, опубликованный в 1962 г.

Все гидравлические и русловые исследования первого периода развития института были проведены на основе теории подобия и анализа размерностей, начатых разработкой еще в Ленинградской ГЭЛ. Развитие И. В. Егназаровым теории подобия и моделирования является характерной особенностью работ как Ленинградской, так и Ереванской лабораторий. Это же развитие послужило и базой модельных исследований и второго периода развития Института.

В первом периоде кандидатскую диссертацию защитили: А. М. Осепян (1947 г.) на тему: «Использование сезонной гидроэнергии в производстве карбида кальция», Г. А. Атанесян (1948 г.) «Промышленная вольтова дуга в электрической цепи», А. Н. Важнов (1948 г.) «Предвычисление дождевых паводков на реках Армении для целей гидрологических прогнозов», С. М. Исаакян (1948 г.) на тему: «Воронкообразование перед забральными стенами водоприемников».

Второй этап развития института (1948—1959 годы).

Институт продолжал работать по прежней тематике, но отдельные проблемы получили большее развитие и начали свои развития проблемы моделирования гидроэнергосистем с созданием специальной лаборатории, и волновые проблемы в нижних бьефах гидростанций (Куйбышевская ГЭС) с созданием новой большой открытой Норкской лаборатории, а также получили усиленное развитие полевые исследования на гидростанциях и на озере Севан.

В состав ВЭНИ входили сектора: Гидроэнергетики (руководитель А. М. Осепян); Гидравлики потоков и сооружений (руководитель А. К. Ананян); Моделирования Гидроэнергосистем (И. В. Егназаров и К. Х. Овсепян); Отдел полевых исследований (руководитель с 1952 г. Б. И. Бек-Мармарчев).

Согласно заданий правительства сектором гидроэнергетики были разработаны методы рационального использования водных ресурсов рек республики и, особенно—вод озера Севан. Уточнялась и усовершенствовалась методика определения будущей роли Севан-Разданского каскада ГЭС при совместной работе с другими каскадами ГЭС республики (например, Воротанским) и в общей Закавказской энергосистеме. По этим вопросам был составлен ряд рекомендаций, которые переданы соответствующим организациям.

Большие работы были проведены в секторе гидроэнергетики по годовичному и многолетнему регулированию Энергетической системы с участием потребителей регуляторов (А. М. Осепян).

В 1955—1956 гг. были разработаны предварительные схемы использования вековых запасов вод оз. Севан в условиях компенсации части пусков воды из него за счет переброски стока рек соседних бассейнов и других мероприятий. Эти работы проводились институтом. В них участвовал проф. М. А. Мостков, который в 1932 г. выдвинул идею пополнения

озера Севан стоком рек соседних бассейнов. Эти проработки явились материалом для составления новой схемы рационального использования вод оз. Севан. В связи с этим, проработаны некоторые научно-теоретические вопросы, относящиеся к режимам электростанций производств с целью приспособления их работы к переменному режиму сезонных ГЭС и гидроэнергосистемы; к выбору экономически оправдываемой расчетной нормы обеспеченности работы ГЭС при различных режимах их работы в годовом и многолетнем разрезах (А. М. Осепян); к влиянию различных факторов на величину и размещение аварийного резерва в гидроэнергосистеме (С. Г. Саркисян); к установлению водно-энергетических характеристик незарегулированных деривационных ГЭС, входящих в гидроэнергосистему (М. С. Торгомян); к определению параметров и эффективности схем энергетического и энерго-ирригационного использования малых и средних рек применительно к горным условиям (Л. А. Чилингарян). Разработан универсальный показатель водноэнергетического режима и участия высоконапорной ГЭС в суточном регулировании при наличии верхового водохранилища, что послужило темой кандидатской диссертации В. П. Мартынова. Изучены вопросы выбора установленной мощности деривационных ГЭС, работающих в каскаде (О. П. Шербакова).

В секторе гидроэнергетики помимо работ, непосредственно связанных с Севанской проблемой, разрабатывались вопросы гидроэнергетики, водноэнергетических расчетов и энергоэкономки. В секторе были защищены пять диссертаций: в 1956 г. докторскую диссертацию защитил А. М. Осепян на тему: «Основные вопросы экономики гидроэнергетики». В 1953 г. кандидатскую диссертацию М. С. Торгомян: «Водно-Энергетические характеристики незарегулированных деривационных ГЭС, входящих в гидроэнергосистему», в 1955 г. — кандидатскую диссертацию аспирантка института Ш. А. Шахбазян: «Внутригодовое распределение стока рек Армянской ССР и методика его расчета», в 1954 году — кандидатскую диссертацию С. Г. Саркисян: «Вопросы установления аварийного резерва в гидроэнергетической системе», в 1958 г. кандидатскую диссертацию Л. А. Чилингарян: «К вопросу энергетического и энерго-ирригационного использования малых и средних горных рек».

В 1955 г. был завершен первый этап комплексного исследования по теме: «Энергетика, экономика и автоматика суточного регулирования каскада ГЭС, работающего в гидроэнергосистеме» и опубликовано И. Егiazаровым статья по постановке исследования с разработкой его основ.

Характерной особенностью этого периода является развитие гидравлических исследований, которые были связаны со строительством Севано-Разданского каскада ГЭС. В течение второго периода формировалась и основная научная проблематика секторов и лабораторий, над которой институт работает и в настоящее время.

Гидравлическим исследованиям подверглись почти все гидротехнические узлы и сооружения Севано-Разданского каскада, а именно: деривация (повороты, переходные участки и коэффициенты шероховатости), головные сооружения (водоприемник, промывник, водосброс плотины и под-

ходные сооружения) Гюмушской, Арзнинской и Ереванской ГЭС, шугосброс, напорный бассейн, бассейн суточного регулирования, быстроток Гюмушской ГЭС, уравнительная башня Арзнинской ГЭС. Исследованию подвергся также наносный режим Ахпаринского водохранилища (в голове деривации Гюмушской ГЭС), станционный узел Гюмушской ГЭС, Аркельское водохранилище (в голове Арзнинской ГЭС), нижний бьеф Арзнинской ГЭС, сопряжение выходного тоннеля СеванГЭС с деривацией Атарбеянской ГЭС и т. д.

Гидравлическая лаборатория исследовала по заданию Министерства Водного Хозяйства также головные сооружения Талинской ирригационной системы, так как Мин. Водн. Хозяйства не имело своей лаборатории.

Основная задача перечисленных выше исследований заключалась, в первую очередь, в проверке проектных предложений в нахождении оптимальных размеров сооружений и их наилучшей формы с точки зрения гидравлики потока. В задачи исследований входило также установление и уточнение ряда расчетных коэффициентов и параметров, без которых нельзя было установить оптимальные размеры тех или иных сооружений.

Перечисленные выше гидравлические исследования чувствительно помогли проектным и строительным организациям для разработки более экономичных типов и конструкций сооружений каскада. Так, например, при исследовании водоприемных сооружений Гюмушской ГЭС выяснилось, что можно примерно в два раза уменьшить размеры этого сооружения (против проекта), если промывные галереи сделать прямолинейными. Благодаря этому намного улучшается и эксплуатация сооружений в смысле попадания наносов из водохранилища в деривацию. Этот тип водоприемника впервые был предложен И. В. Егнazarовым, исследован и осуществлен на Чирчикских ГЭС в Средней Азии. Он успешно выполняет свои функции и на каскаде, где эта система водозабора осуществлена и на Гюмушской ГЭС.

То же самое можно сказать о компоновке сооружений напорного узла Гюмушской ГЭС, шугосброса на деривации Гюмушской ГЭС, переходных участков на деривациях С—Р каскада, выража на быстротоке Гюмушской ГЭС, новый тип гидравлического сооружения внедренный на Чирчикской ГЭС Ленинградской ГЭЛ, уравнительной башни Арзнинской ГЭС и т. д. Перечисленные мероприятия и последующие теоретические исследования производились под руководством А. К. Ананяна при активном участии научных сотрудников А. Г. Назаряна, М. И. Тер—Аствацатрян, У. Г. Арутюнян, А. О. Гамбаряна, М. С. Похсерадяна, С. М. Исаакян, В. И. Жамагорцяна, Л. А. Оганесяна и др. Следует отметить большую работу, которую выполняли Ар. Г. и А. Г. Экимяны и С. Петросян по обеспечению модельных установок измерительной техникой и разными приспособлениями.

Указанные научные работники восприняли богатый экспериментальный опыт ленинградской гидроэлектрической лаборатории. В 1953 г. в связи с пуском Гюмушской ГЭС сотрудники института И. В. Егнazarов,

А. К. Ананян и А. Г. Назарян были награждены почетными грамотами Верховного Совета Армянской ССР.

Во втором этапе встала необходимость в усиленном исследовании сооружений Севано-Разданского каскада в натурных условиях. В связи с этим в конце 1958 года был организован отдел полевых исследований (руководитель Б. И. Бек-Мармарчев при большом участии В. Н. Жамагорцяна), который работал в тесном контакте с сектором Гидравлики потоков и сооружений. Задача этого отдела заключалась в осуществлении научной связи с Арменэнерго для разработки оптимальных режимов эксплуатации каскада ГЭС и для проверки в натурных условиях результатов экспериментальных работ. Из выполненных отделом работ следует отметить исследование головных сооружений Гюмушской ГЭС. Результаты подтвердили правильность результатов лабораторных исследований и условий моделирования, и позволили выявить некоторые дефекты, устранение которых в дальнейшем улучшило работы промывных галерей головных сооружений ГюмушГЭС. Отделом полевых исследований и Гюмушской ГЭС была установлена действительная пропускная способность деривации, исследована работа быстротoka холостого сброса, заилиение Ахпаринского водохранилища, распространение волны пропуска по деривации и др. Результаты этих исследований были использованы Арменэнерго при разработке эксплуатационных режимов Севано-Разданского каскада. Были спроектированы также схемы измерительных устройств и приспособлений, на основании чего были составлены проекты, по которым в сооружениях каскада, в процессе строительства, были заложены соответствующие закладные части. Непосредственно перед пуском Арзнинской станции в эксплуатацию (ноябрь 1956 г.) в тоннеле № 2 отделом полевых исследований было проведено исследование по определению фактического коэффициента шероховатости бетонной облицовки. При этом впервые в Советском Союзе был применен для этой цели аэродинамический метод, основанный на моделировании водного потока воздушным потоком. Для создания воздушного потока был использован авиационный мотор с самолета ЛИ-2. Эта трудоемкая работа, требовавшая хорошей теоретической подготовки, была выполнена Г. И. Мелконяном. Результаты исследования дали проектирующей организации основание для снижения на одну единицу значения коэффициента шероховатости облицовки тоннелей Атарбемянской ГЭС, что привело к существенному сокращению сечения этих тоннелей. В дальнейшем аналогичные работы были выполнены на тоннеле Атарбемянской ГЭС.

В результате теоретических и экспериментальных исследований была защищена докторская диссертация А. К. Ананяна: «Поперечная циркуляция при изгибе потока», и опубликована монография «Движение жидкости на повороте водовода», в которых дается гидромеханическое решение задачи по определению поля поперечных и продольных скоростей в потоке на его повороте, а также до и после поворота, причем рассмотрены случаи напорного и безнапорного водоводов любой формы. В диссертационной работе Л. А. Оганесяна «О турбулентном движении на повороте напорного

водовода» используется вариационный метод для решения дифференциального уравнения осредненного турбулентного потока на повороте водовода при переменном коэффициенте турбулентного перемешивания. Кроме того, указанным автором был развит метод малого параметра и применен для интегрирования указанного уравнения.

Диссертационная работа В. Н. Жамагорцяна «Неустановившееся движение вдоль бокового водослива», посвящена теоретическому решению задачи о срезке волны боковым водосливом на основе тонко поставленных экспериментов благодаря применению высокой экспериментальной техники, преимущественно разработанной исходя из опыта Ленинградской Гидроэлектрической лаборатории.

В диссертационной работе А. Г. Назаряна «Гидравлика переходных участков» дано развитие теории движения жидкости на переходных участках открытых каналов и предложен метод расчета поля продольных и поперечных скоростей, а также потерь напора при сужении или расширении потока на сравнительно короткой длине перехода.

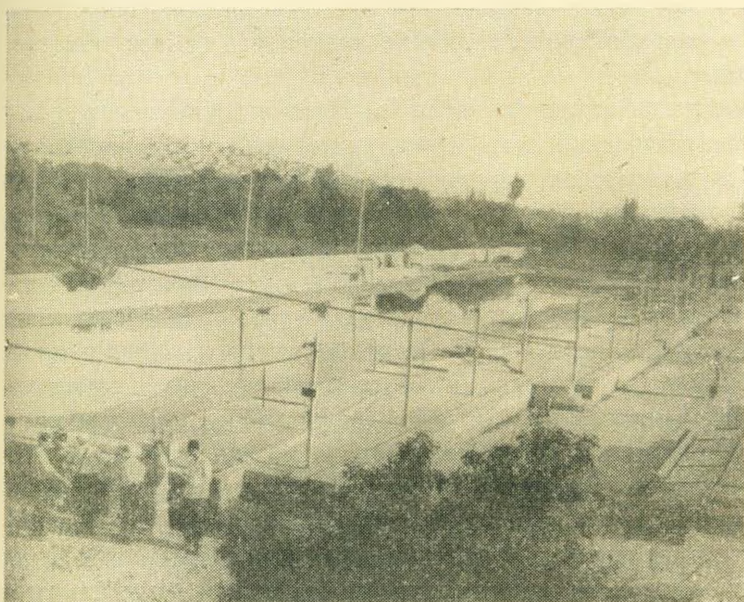


Рис. 2.

В диссертационной работе по потокам в диффузорах и конфузорах В. Г. Санояна, который проходил аспирантуру в Ленинграде, дается теоретическое построение формы конфузоров и диффузоров, при которых доводятся до минимума потери энергии при местной деформации потока.

Обеспеченность руководством и кадрами экспериментаторов дали возможность институту принять на себя проведение данного исследования волнового гидравлического режима в шлюзной системе и в нижнем бьефе Куйбышевского гидроузла. С этой целью в 1951 г. в течении 8 месяцев в пригороде Еревана, в Норке была создана открытая лаборатория, в кото-

рой в масштабе 1 : 150 была построена модель всего гидроузла (рис. 2). Результаты лабораторных исследований были использованы Гидропроект-ом МВД СССР для установления нормальных условий отстоя и передвижения судов в нижнем подходном канале к шлюзу и в нижнем бьефе Куйбышевской ГЭС.

Эти исследования и их теоретическая и экспериментальная разработка проводились под руководством И. В. Егiazарова при активном участии В. И. Жамагорцяна и Б. О. Егiazаряна.

С 1949 г. И. В. Егiazаров разрабатывал теорию транспортирующей способности потока. При этом были использованы опыты на модели р. Гедар, его опыты в Ленинградской лаборатории и многочисленные опыты, которые выполнялись другими исследователями как в Советском Союзе, так и за рубежом. В результате обобщения этих опытов на основании теории подобия и размерностей получены основные критериальные зависимости, определяющие условия транспорта наносов потоками большой и малой мутности при любых режимах движения для однородных по крупности наносов. Разрабатывалась также теория моделирования размываемых русел, которая имеет большое практическое значение. В настоящее время им разрабатывается теория транспорта смеси наносов различной крупности.

Во втором этапе развития в Институте изучался ряд тем по гидрологии рек республики. Результаты этих исследований были опубликованы в монографии научного сотрудника института А. Н. Важнова: «Средний многолетний сток рек Армянской ССР и его внутригодовое распределение», В 1951 году Б. И. Бек-Мармарчев защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Вековые колебания уровня озера Севан».

В 1950 году по инициативе и под научным руководством И. В. Егiazарова разработавшего теорию моделирования гидравлического удара была организована лаборатория моделирования гидроэнергосистем.

Основное направление научной деятельности лаборатории является физическое моделирование гидроэнергосистем и изучение переходных процессов для повышения результирующей устойчивости и качества регулирования гидростанций (гидроагрегатов), работающих в системе, во взаимодействии гидравлической и электрической частей гидроэнергосистемы.

Разработанная теория моделирования гидравлического удара показала, что по условиям подобия необходимо на модели получить скорость волны гидравлического удара во много раз меньшую чем в натуре. Следствием этой теории явилось введение воздуха в поток трубопровода, что практически свелось к введению в трубопровод резинового шланга.

Методика и практика моделирования гидравлического удара при наличии резинового шланга с воздухом и моделирования турбин была разработана с участием Б. Л. Буннятына, З. А. Зоряна. Теория моделирования турбины разрабатывалась Б. Л. Буннятыном, а динамические характеристики турбины при нестационарных процессах—А. А. Асламазян.

Благодаря созданию теории моделирования гидродинамической части ГЭС удалось динамическую модель (фиг. 3) использовать для решения

большой группы задач практики. К. Х. Овсепян исследовал динамические режимные характеристики гидромеханической части ГЭС. Им показано, что при переходных режимах изменение крутящего момента гидротурбины происходит с запаздыванием.

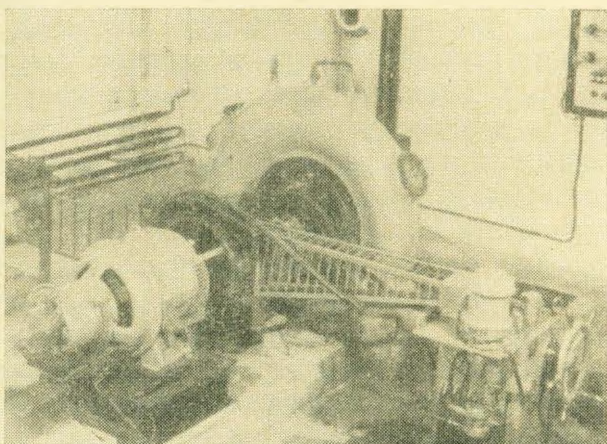


Рис. 3.

Основные достижения лаборатории моделирования в области теории заключаются в установлении (на основании опытов на динамической модели) новых аналитических зависимостей и в уточнении существующих зависимостей, описывающих физические процессы, происходящие в отдельных элементах гидромеханической части ГЭС при гидравлическом ударе (при переходных процессах). Кроме того, удалось установить начальные и граничные условия интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в гидромеханической части ГЭС (Б. Л. Бунятян), и в частности в отсасывающей трубе гидротурбин. В 1952 г. им защищена кандидатская диссертация по МикроГЭС-ом большой мощности.

В 1951 г. Х. Р. Палян защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Принцип моделирования электрических машин и трансформаторов для экспериментальных исследований устойчивости параллельной работы электростанций». В 1959 г. К. Х. Овсепян защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование сбросов и набросов нагрузки в гидроэнергосистемах в связи с определением временной неравномерности хода гидроагрегата и его маховых масс».

Из работ, выполненных лабораторией в помощь производству следует отметить: исследование режимов работы трубопровода КанакерГЭС и испытание гидравлической части защиты от последствий разрыва трубопровода; разработку дифференциальной защиты от последствий разрыва трубопровода и ее испытание на КанакерГЭС. Экспериментальное исследование на Октемберянской и Арташатской ГЭС по улучшению режимов регулирования и исследования по снятию характеристик агрегатов; Иссле-

дования способа измерения угла выбега синхронных генераторов, предложенного Г. А. Бакунцем; натурные испытания на Дзорагетской ГЭС совместно с Лабораторией Арменэнерго, ВНИНЭ и МЭИ, и исследования автоматического регулятора агрегата № 3 ДзораГЭС.

В секторе гидроэнергетики на основе исследований по регулированию энергетической системы с участием регуляторов потребителей была разработана методика экономического обоснования расчетной нормы обеспеченности (А. М. Осемян) ГЭС. В работе дан метод оценки разного качества электроэнергии, причем показано, что эталоном должны послужить тепловые станции и главным образом потребители-регуляторы. Эти исследования были использованы для технико-экономического обоснования переброски стока р. Арпа в озеро Севан.

В конце второго периода развития института вышло постановление ЦК КПА и Совета Министров Армянской ССР от 12 декабря 1956 г. «О мерах по ускорению строительства Севано-Разданского каскада и усилению научно-исследовательских работ по рациональному использованию вод оз. Севан». Этим постановлением Президиуму Академии Наук Армянской ССР было поручено усилить сектор гидроэнергетики, реорганизовав его в сектор общей энергетики, а также восстановить в составе института сектор гидрологии (включая и вопросы метеорологии, которые неотделимы).

Следует отметить, что для координации научно-исследовательских, проектных работ и разработки мероприятий по Севанской проблеме при Совете Министров Армянской ССР был создан Севанский Комитет, под председательством Первого заместителя Председателя Совета Министров Армянской ССР—С. А. Мовсисяна. В состав этого Комитета из Академии наук вошли Президент АН В. А. Амбарцумян, директор ВЭНИ А. К. Анянян и И. В. Егназаров.

С начала 1957 г. в деятельности института наметился существенный перелом в связи с возникновением новой ситуации в развитии энергетической базы и с перспективными наметками семилетнего, а в дальнейшем и двадцатилетнего планов развития Народного хозяйства СССР. В свете этой перспективы значительно снижается энергетическая роль каскада ГЭС, который до того являлся основой развития всех сторон народного хозяйства Армянской ССР и в первую очередь его индустриализации. Выработка каскада, составляющая около 2,5 млрд. квт-часов в год, составит меньше чем половину потребного количества энергии в 1965 году (конец семилетки) и чуть ли не одной десятой соответствующей потребности к 1980 году. При этих условиях развитие республики возможно путем создания значительно более мощной энергетической базы, чем современная, и основанной на строительстве мощных тепловых станций и новых гидроэнергетических объектов. Такие возможности открылись благодаря обнаружению нового (Карадагского) месторождения природного газа в Азербайджанской ССР, который частично мог быть использован для производства электроэнергии на месте с передачей ее в Армянскую ССР и частично для передачи непосредственно в Армению для

использования на строящихся ТЭЦ в г. Ереване и в г. Раздане, а также на других намечаемых постройкой ТЭЦ.

Естественно возник вопрос о сокращении и даже прекращении попусков из оз. Севан вековых запасов воды в нем и сохранения тем самым уровня этого озера на высокой отметке, близкой к естественным условиям. Новая обстановка потребовала пересмотра старых основ Севанской проблемы и постановки новых научных исследований как в ирригационной, так и в энергетической части, которые в основном легли на Институт водных проблем. Для разрешения проблемы сохранения озера Севан институт не имел достаточных исходных данных по новой обстановке в бассейне озера в связи с понижением его уровня к этому времени примерно на 10–11 м. Кроме того, необходимо было усилить все работы, которые были связаны с изучением водных источников С—Р системы и переброской стока из соседних бассейнов в озере Севан. Необходимо было более углубленно заняться вопросами водной эрозии, которая происходит на обнаженной территории дна озера Севан.

Институт должен был усилить разработку вопросов общей энергетики, обосновать перспективную структуру энергосистемы Армении и необходимость единой энергетической системы Закавказья. Необходимо было также заниматься вопросами теплоснабжения и газоснабжения промышленных объектов на территории республики. Все перечисленные вопросы не были новыми для института. Институт всегда занимался водными источниками системы, структурой энергетической системы республики, водной эрозией на обнаженной территории, возможностью переброски стока рек в озеро Севан и т. д. Однако все эти работы в связи с новым подходом к проблеме использования озера Севан приобрели гораздо большее значение, чем это имело место в предыдущие периоды.

Проблема сохранения оз. Севан стала реальной после того, как были открыты новые месторождения газа в Азербайджане и стала возможной передача этого газа в Армению для работы тепловых станций в нашей республике, а также возможность использования в АрмССР энергии Мингечаурской ГЭС. Такие возможности открылись в период после 1955 года.

После 1956 года Институт усилил экспедиционные работы в бассейне озера Севан и вел их главным образом в следующих трех направлениях: исследование гидрометеорологической обстановки в бассейне озера Севан в новых условиях для составления водного баланса озера для той отметки, на которой будет приостановлен дальнейший его спуск. В 1956 году исследованием гидрометеорологической обстановки занималась Экспедиция Государственной Геофизической Обсерватории (ГГО) им. Воейкова (руководитель д-р ф. м. н. М. П. Тимофеев). В составе этой экспедиции работало около 30 человек. Экспедиция была оснащена новейшими измерительными приборами. Следует отметить, что инициатором организации этой экспедиции был И. В. Егназаров, но институт в 1956 г. непосредственно не участвовал в этих работах, способствуя и направляя ее про-

ведение. Задача экспедиций заключалась в проведении исследований с целью составления уточненного водного баланса озера.

Большие работы были выполнены для исследования гидрогеологической обстановки в бассейне озера. Применялись буровые и геофизические методы разведки для установления подземной составляющей водного баланса озера (отток и приток). Гидрогеологические исследования выполнялись Управлением геологии и Охраны недр АрмССР и Лабораторией гидрогеологических проблем АН СССР. Некоторые работы выполнялись институтом Геологических наук АН АрмССР по исследованию грунтовых вод Мазринской равнины. Всеми этими исследованиями руководил и координировал их директор института А. К. Ананян.

Большую помощь оказал Президент Академии Наук Армянской ССР академик В. А. Амбарцумян, который через Президиум АН СССР (распоряжение № 55—784 от 15/IV—1957 г.) обеспечил участие в наших работах научных работников Лаборатории Гидрогеологических проблем АН СССР и члена-корр. АН СССР В. Ковды (Почвенный институт АН СССР). Результаты экспедиционных исследований 1957—1961 годов послужили основой для составления водного баланса озера для той отметки, на которой будет приостановлен дальнейший его спуск.

При составлении водного баланса большую работу выполнили сотрудники сектора Метеорологии и гидрологии — А. М. Мхитарян, Г. А. Александрян, Э. А. Атаян, Г. Г. Пахчанян, А. Г. Лазарян и др. В работе участвовал также проф. ЕРПИ Е. Д. Сафаров. Некоторую помощь оказали сотрудники УГМС АрмССР. Результатом работы явилось уточнение водного баланса, в основном подтвердившее предыдущие расчеты.

Третий этап развития института (1959—1961 года)

В связи с необходимостью изучения и развития проблем теплоэнергетики и перспективной энергетики, институт из Водно-энергетического был переименован в Институт Энергетики и гидравлики (ИНЭГ).

В состав Института входили следующие сектора: Общей энергетики (рук. А. М. Осепян) с включением группы по теплоэнергетике (Л. Т. Кулоян); 2. Гидравлики (рук. А. К. Ананян). 3. Гидрологии и метеорологии (рук. А. М. Мхитарян), 4. Моделирования гидроэнергосистем (рук. К. Х. Овсепян), 5. Полевых исследований (рук. Б. И. Бек-Мармарчев), 6. Перспективной энергетики (рук. Я. Т. Шермазанян).

Были усилены исследования по озеру Севан в связи со стремлением прекратить спуск озера с 1965 года и начать разработку вопросов использования газа в АрмССР и строительства ТЭЦ. Но создать за эти два года, как было намечено, сектор теплоэнергетики и его лабораторную базу не удалось. Сектор перспективной энергетики занялся исследованиями по созданию солнечной печи высоких температур. Вопросы использования ветра отошли на задний план, как бесперспективные для масштабного электроснабжения АрмССР.

В третий этап своего развития институт не только продолжил начатую ГГО работу, но и значительно расширил и углубил ее. Для этой цели, по инициативе А. М. Мхитаряна, на берегу Арданишского залива оз. Севан была создана научно-исследовательская гидрометеорологическая база. Кроме того, проводились метеорологические наблюдения в 28 пунктах в бассейне озера Севан и в 7 точках на его акватории. Кроме наблюдений на указанных 35 стационарных пунктах проводилось изучение условий трансформации воздушных масс над озером в специальных створах — разрезах. Изучались специфические условия развития процессов образования облачности, выпадения осадков, испарения как с поверхности водоема, так и с почвы и сельскохозяйственных угодий. На Арданишской базе исследования велись не только новыми, но и уникальными приборами, созданными в Институте.

Результаты натурных и теоретических исследований по гидрометеорологии и водному балансу озера Севан опубликованы в 1961 году в первом томе сборника: «Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме» (Издательство Академии Наук Армянской ССР). В 1961—1962 годах сектор метеорологии и гидрологии выполнил большой цикл работ по теории тепло- и влагообмена в приземном слое атмосферы над водоемами и сушей. Были применены современные методы (теплового баланса, турбулентной диффузии и гидрологический) для расчета испарения с поверхности водоемов и суши в горных условиях.

В течение ряда лет ГГО им. Воейкова (1957—1959 гг.) и высокогорным Физическим Институтом АН СССР (1960—1961 гг.) с участием института водных проблем велись в бассейне озера Севан и в смежных с ним районах исследования по физике кучевых облаков с целью выяснения возможности вызывания искусственных осадков.

Выше было отмечено, что экспедиционные работы велись также по исследованию русловых процессов и водной эрозии. Цель этих исследований заключалась в получении необходимых данных для разработки мероприятий, обеспечивающих борьбу с непроизводительными потерями воды и по защите сельскохозяйственных угодий и различных сооружений от смыва и подмыва. Результаты натурных и теоретических исследований по русловым процессам опубликованы в 1962 году во втором томе «Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме».

Значительные исследования провел сектор общей энергетики по проблеме сохранения озера Севан. Была разработана водохозяйственная основа новой схемы использования вод озера Севан и более полного использования водных источников Севано-Разданской системы для энергетики и ирригации (М. Торгомян и Л. Чилингарян). Была разработана модель перспективной структуры энергосистемы Армении, а также ряд технико-экономических показателей энергии различного качества (сезонной и регулирующей) и размеры аварийных резервов объединенной энергосистемы. Результаты исследования по водному хозяйству и энергетике изложены в третьем томе указанного выше сборника, который вышел из печати в 1962 г. В указанной работе отмечается целесообразность оставления

уровня озера на отметке 1896 м (т. е. на 20 м ниже первоначальной). При этом озеро превращается в регулятор ирригационной системы, а гидростанции каскада — в многолетний регулятор объединенной энергосистемы Закавказья и аварийный резерв этой системы. Исследования по аварийному резерву проведены к. т. н. С. Г. Саркисяном. Для компенсации стока отбираемого из вековых запасов воды озера Севан на нужды ирригации и энергетики намечается ввести в водный баланс озера сток, перебрасываемый из соседних бассейнов, а также дополнительные (ранее не предусмотренные Генсмеймой) водные ресурсы Севан-Разданской системы в том числе и подземные воды Араратской равнины. После осуществления всех мероприятий по сохранению озера будут примерно в два раза расширены орошаемые площади. Одновременно будут полностью использованы мощности ГЭС каскада. Результаты этих исследований по водному хозяйству и энергетике опубликованы в 1962 году в третьем томе «Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме». Мероприятия по сохранению озера по плану намечается завершить в 1968 году. Результаты проработок Института были доложены на Севанском комитете при Совете Министров Армянской ССР и на Президиуме АН Армянской ССР (протокол № 7 (352) от 16/IV—1958 г.) и одобрены Постановлением ЦК КП Армении и Совета Министров республики от 22/XII—1960 года.

Проработки Института и Армгидэпа нашли отражение в Постановлении СМ СССР «О мероприятиях по переброске части стока воды реки Арпа в озеро Севан с целью сохранения его уровня на отметке, близкой к естественным условиям» (Постановление от 12 августа 1961 г. за № 726).

Кроме этого, в Институте продолжались работы по гидравлическим исследованиям. В третьем этапе развития объем лабораторных исследований по заказам проектных организаций значительно уменьшился. Были выполнены модельные исследования головных сооружений Ереванской ГЭС на реке Раздан. Аналогичные исследования проводились по Воротанскому каскаду ГЭС (головные сооружения Татевской ГЭС). В настоящее время исследуется Ереванское водохранилище на р. Раздан.

Эксперименты на модели головных сооружений Татевской ГЭС преследовали цель выбора рационального типа шахтного водосброса, один из вариантов которого был предложен АрмГИДЭПом. Опыты показали рациональность схемы оголовка сбросной шахты, представляющего из себя водослив в форме «Маргаритки». Теоретические исследования проводились В. Г. Санояном. В результате исследования головных сооружений Ереванской ГЭС была рекомендована схема сбросного канала с выражем и непрерывным боковым сливом по всей длине канала.

Третий период для сектора гидравлики потоков и сооружений характеризуется развитием сочетания теоретических исследований с тонко поставленными опытами по гидравлике бурного потока, делению потока и по многокомпонентным потокам. В 1962 году были завершены диссертационные работы. Диссертация А. О. Гамбаряна на тему: «Экспериментальное исследование и метод расчета быстротоков при сверхбурном режиме». Диссертация М. С. Похсаряна на тему «Некоторые вопросы бесплотин-

ного водозабора и поперечных форм размываемых русел». Э. Т. Джрбашяном подготовлена диссертация по теории взвесенесущих потоков малой мутности.

Лаборатория моделирования энергосистем обогатилась двумя электронными счетно-решающими машинами непрерывного действия. При помощи модели удалось произвести некоторые практические расчеты и сопоставить теоретические расчеты с данными модельных опытов (К. Х. Овсепян). В последние годы научным сотрудником Лаборатории Н. К. Ионанесяном разрабатывается теория устойчивости регулирования гидроагрегатов при гидравлическом ударе и дано аналитическое решение задачи удара. В 1960 г. А. А. Асламазян защитила кандидатскую диссертацию на тему «Характеристика гидротурбин в переходных режимах», в которой дается метод построения динамических характеристик гидротурбин.

Четвертый этап развития института 1961—1963 гг.

В связи с Постановлением Совета Министров СССР от 22 апреля 1960 г.: «О мерах по упорядочению использования и усилению охраны водных ресурсов СССР» задачи института в области водных исследований значительно расширились. Поэтому Президиум Академии наук Армянской ССР и Совет Министров Армянской ССР сочли целесообразным энергетические вопросы сосредоточить в институте Электротехники, превратив его в Институт Энергетики, а Институт Энергетики и Гидравлики превратить в Институт водных проблем. Сектор общей и перспективной энергетики были переданы в институт энергетики, а в Институте водных проблем были организованы новые сектора. В настоящее время в институте водных проблем имеются следующие сектора и лаборатории: комплексного использования водных ресурсов, (рук. М. С. Торгомян); Метеорологии и гидрологии (рук. А. М. Мхитарян); прикладной гидродинамики (рук. В. Г. Саноян); натурных исследований (рук. Б. И. Бек-Мармарчев); подземных вод (рук. А. К. Ананян); лаборатория измерительной и вычислительной техники (рук. К. Х. Овсепян); лаборатория моделирования гидроагрегатов (рук. Б. Л. Буниатян). Число сотрудников института—105, в том числе научный и научно-вспомогательный персонал—80, 18 кандидатов наук и 2 доктора наук. Институт имеет 10 аспирантов, которые обучаются в Москве, Ленинграде и в Новосибирске в Сибирском Отделении Академии наук СССР.

На Институт водных проблем возложена разработка научных основ комплексного использования водных ресурсов республики, методов составления перспективной схемы единой водной системы и методов управления ее режимами; гидравлические исследования гидроэнергосистем, вопросов гидрометеорологии, промышленного водоснабжения, водоотведения и обезвреживания сточных вод и др. По предложению И. В. Егназарова Институт с 1960 г. разрабатывает проблему уменьшения потерь воды на испарение с поверхности водоемов и озер. Армения бедна вод-

ными ресурсами, поэтому нахождение новых водных источников представляет большой интерес для народного хозяйства. Расчеты показали, что с поверхности озер и водохранилищ в среднем за год испаряется свыше одного миллиарда куб. м. воды. В связи с этим возникает необходимость в осуществлении мероприятий по уменьшению потерь весьма дефицитной воды. Эта проблема представляет большой интерес для засушливых районов СССР. Суть ее заключается в следующем: при помощи специальных химических веществ (поверхностно-активных) на поверхности воды создается пленка толщиной в одну молекулу (монослой). Эта пленка препятствует испарению воды, но не препятствует нормальным процессам газообмена в водоемах, проникновению солнечных лучей. Она безвредна для флоры, фауны и для любых живых организмов.

Лабораторные опыты поставлены в специально построенном бассейне площадью 650 кв. м. в Норке. Бассейн снабжен волнопродуктором и аэродинамическим стендом, при помощи которых исследуются прочность и устойчивость монослоев при ветре и волнении. В натурных условиях опыты поставлены на Арданинском озере, площадь которого равняется 40 га. Это озеро расположено в замкнутой котловине, оставшейся на бывшем дне оз. Севан после понижения его уровня. Следует отметить большую работу В. Н. Жамагорцяна по этим исследованиям. Результаты натурных и лабораторных опытов показали, что химикаты отечественного производства (спирты из вторых неомыляемых) по своим качествам, за исключением запаха, не уступают импортным химикатам (дециловые спирты), которые получили большое распространение во многих странах мира. Опыты показали также, что при помощи поверхностноактивных веществ в условиях нашей республики можно уменьшить испарение примерно на 20%. Это составляет около 200 млн. куб. м. воды в год, что увеличивает естественный сток из озера Севан больше чем вдвое. Подсчеты И. В. Егiazарова показали, что таким методом ежегодно можно отвоевать у природы (в засушливых районах СССР), примерно 30 куб. км. воды.

Проблема уменьшения потерь воды на испарение еще полностью не решена в части относящейся к влиянию ветра. Предполагается, что с 1963 года результаты исследований можно будет внедрять в народное хозяйство.

Следует отметить, что указанная проблема входит в число важнейших проблем по Советскому Союзу. Основные работы по затронутой выше проблеме выполняются совместными усилиями ИВП, Института Физической химии АН СССР, (А. А. Трапезников) Института Органической химии АН СССР (А. Д. Петров), а также ВНИИГиМ им. Костякова.

Развитие Института привело к необходимости концентрации в одном секторе всех исследований, связанных с измерительной и вычислительной техникой и разработки научных проблем в этой области. В связи с этим в 1961 году в институте была проведена подготовительная работа для создания самостоятельного сектора, что было сделано в 1962 г.

Следует также отметить работы 1962 г., связанные с исследованием подземных вод Араратской равнины. Для их выполнения была создана

группа научных сотрудников различных секторов (М. С. Торгомян и др.). В результате исследования определены все составляющие водного баланса на отдельных высотах Арагацского массива. Разрешение этой проблемы представляет большой интерес как для проблемы сохранения оз. Севан, так и для сельского хозяйства.

В дальнейшем институт продолжит свои исследования по нахождению новых источников воды для энергетики, ирригации и водоснабжения. Он будет заниматься проблемой управления режимами комплексных водных систем, проблемами водоснабжения крупных промышленных объектов и обезвреживания сточных вод для их использования в ирригации и водоснабжении. Будут продолжены работы по установлению перспективных водных балансов республики с учетом влияния на сток водохозяйственных мероприятий.

Здание Института и его оборудования

Переезд в 1943 г. И. В. Егиазарова из Ленинграда в Ереван, а также переброска лабораторного оборудования и измерительной техники из созданной им, еще в 1924 году в Ленинградском Электротехническом институте им. Ульянова (Ленина), Ленинградской гидроэлектрической лаборатории, дали возможность в течение короткого промежутка времени создать в Армении современную научно-исследовательскую базу для гидравлических исследований. Это служило большим стимулом к концентрированию вокруг этого научного центра кадров гидротехников, обучению их технике лабораторных исследований и решению научных проблем гидроэнергетики.

В состав гидроэлектрической лаборатории входят следующие сооружения и оборудования.

В первом этаже здания (фиг. 4) построен железобетонный резервуар (1) емкостью 300 м³ и канал (2), которые заполняются водою из городской водопроводной сети. Четыре центробежных насоса (3) на 500 л/сек из резервуара подают воду в напорный бак (4) емкостью 30 м³, установленный во втором этаже, создавая напор в 6,0 м. В напорном баке установлена система сбросных водосливов, при помощи которых избыток воды через трубу (5) сбрасывается обратно в резервуар, сохраняя постоянный уровень в напорном баке. По кольцевому трубопроводу (6) диаметром 0,25 м вода подводится к двум модельным площадкам (7) размерами по 200 кв. м., где сооружаются пространственные модели (фиг. 1). Отработанная вода из моделей через сбросные трубы (8) возвращается в резервуар (фиг. 4). Система циркуляционная. Для исследований плоской задачи гидравлики в большом зале второго этажа лаборатории установлены три остекленных лотка. Большой лоток (9) длиной 19 м, шириной 0,5 м, средний лоток (10) длиной 6,5 м, шириной 0,2 м, малый лоток (11) длиной 5,0 м, шириной 0,1 м имеют металлические баки-успокоители и питаются из напорного бака по кольцевому трубопроводу (6). Имеется возможность менять их уклон от отрицательного до положительного больше критического.

В малом зале второго этажа лаборатории, кроме насосов и напорного бака установлены: экспериментальный стенд реактивной гидротурбины с открытой камерой, стенд струйной гидротурбины, агрегат МикроГЭС и большая динамическая модель гидроагрегата (рис. 3).

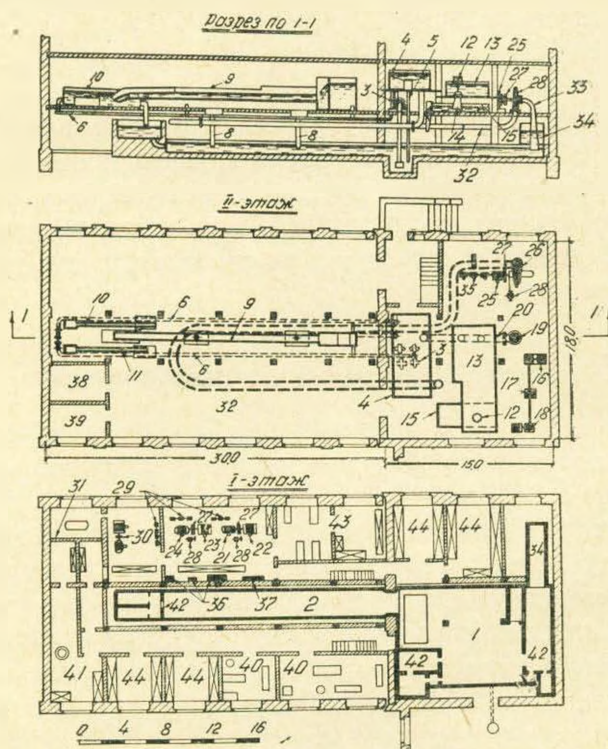


Рис. 4.

Реактивная гидротурбина (12) расположена в верхнем металлическом баке (13) с размерами в плане 10×4 м высотой бортов 1,2 м. Она приспособлена для разных рабочих колес с быстроходностью от 150 до 600, диаметром 0,3 и 0,25 м. Через всасывающие трубы различных типов (14) вода из турбины отводится в нижний бак (15) с размерами в плане 5×3 высотой бортов 1,2 м, откуда через мерные водосливы сбрасывается в резервуар первого этажа. Поворотно-лопаточный направляющий аппарат турбины регулируется вручную. Напор установки 1,9 м, расход от 120 до 400 л/сек, мощность от 2 до 7 л. с.

Бак (13) одновременно служит как русловой лоток для испытания разных моделей, требующих большие расходы воды.

Установка струйной гидротурбины состоит из электронасоса (16), создающего напор 125 м и подающего воду в виндкессель (17), служащий для поддержания постоянного давления. Вода из (17) подается к турбине (18), к валу которой присоединен генератор. Турбина имеет автоматический регулятор скорости и регистрирующий расходомер. Таким образом, установка является миниатюрной гидроэлектрической станцией, которая может работать параллельно с другими установками и в системе.

Агрегат МикроГЭС (19) питается от напорного бака по трубопроводу (20) диаметром 0,5 м, от этого же трубопровода питается верхний бак (13) открытой турбинной установки.

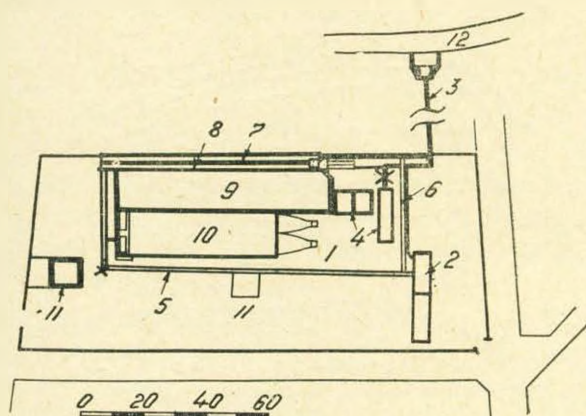


Рис. 5.

Лаборатория моделирования гидроагрегатов и гидроэнергосистем расположена в первом этаже здания и занимает помещение, где размещаются два агрегата моделирующие гидроэлектростанции, линию передачи и нагрузки. Модель третьей гидроэлектростанции расположена во втором этаже (рис. 3). Первый агрегат (рис. 4) состоит из: электродвигателя (21) постоянного тока и синхронного генератора (22) мощностью 5,0 квт, характеристики электродвигателя отвечают характеристикам гидротурбины. Второй агрегат включает синхронный генератор (23) мощностью 25 квт с первичным двигателем (24) также в виде электродвигателя постоянного тока.

Синхронный генератор третьего агрегата (25), расположенный во втором этаже, приводится во вращение гидротурбиной (26). На валу всех агрегатов имеются маховики (27) специальной конструкции со сменными полудисками для изменения момента инерции. Все агрегаты снабжены автоматическими регуляторами скорости (28). Для снабжения электроэнергией постоянного тока первичных двигателей модельных агрегатов, компенсаторов (29) и других вспомогательных оборудования в лаборатории имеется мотор-генератор (30) мощностью 130 квт, напряжением 220—300 вольт. Вся лаборатория питается от трансформаторной подстанции (31) мощностью 320 ква.

Гидротурбина (26) со спиральной камерой имеет рабочее колесо К 245 диаметром 0,3 м, большой напорный трубопровод (32) длиной 70 м, диаметром 0,64 м, отсасывающую трубу (33) длиной 4,2 м, по которой вода отводится в отводящий бак (34), откуда в резервуар (рис. 3).

К валу генератора присоединен мотор-генератор (35) с качающимся статором, позволяющий определить механическую мощность агрегата по показанию весов. Имеется модель ртутной, моторной нагрузки (36) и передачи (37).

Лаборатория имеет фото-кино лабораторию (36), мастерские: точной механики (37), механическую (38), (39), столярную (40), а также приборные (41) и складские помещения (42).

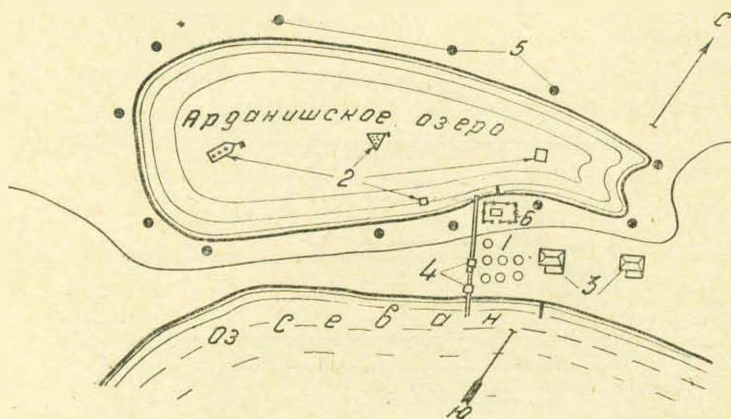


Рис. 6.

После пуска лаборатории гидравлики и сооружений были смонтированы и тарированы (А. А. Асламазян) все измерительные приборы и устройства полученные из Ленинграда.

Лаборатория оснащена новейшими приборами и аппаратурой для гидравлических исследований как установившихся, так и неуставившихся процессов, также приборами для обработки материалов наблюдений и многочисленными приборами для регистрации гидравлических величин электрическим методом (К. Х. Овсепян).

На рис. 1 и 3 представлен общий вид большого и малого зала лаборатории.

В 1951—1952 гг. лабораторная база института намного расширилась за счет открытой Норкской лаборатории, имеющей рабочую площадь свыше 4000 кв. м. (рис. 5). В состав этой лаборатории входит бетонная площадка (1) для моделей и насосная установка (2) производительностью 250 л/сек. Питание лаборатории водой двойное: самотечное — из Норкского оросительного канала (3) и насосное — циркуляционное. Эта площадка в различные периоды оснащалась различными устройствами в зависимости от потребностей исследований на моделях того или иного назначения (рис. 2).

В настоящее время имеются питательные баки (4), коллекторный канал (5) и система трубопроводов (6), установка для исследований быстрых токов (7), бетонный канал (8) для исследования свободной поверхности, большой бетонный бассейн (9) площадью 650 м², два металлических резервуара (10) по 35 м² каждый, предназначенные для исследований по борьбе с испарением с водной поверхности. На территории лаборатории имеются закрытые обслуживающие помещения (10), оснащенные соответствующими приборами и др. В Норке располагается и фотограмметрическая стереоустановка.

В связи с развитием натурных, метеорологических и гидрологических исследований в 1959 году была организована на берегу оз. Севан у с. Арданиш экспериментальная база института (рис. 6), в состав которой входит водно-испарительная площадка с комплектом береговых испарителей (1) диаметром от 0,6 до 5 м и глубиной от 0,6 до 4 м. Здесь же на плотках (2) установлены различные метеорологические приборы. Для камеральных работ и жилья имеются два четырехкомнатных финских домика (3).

На территории базы имеется реликтовое озеро площадью 0,4 кв. км, используемое для целей натурных исследований по испарению и по борьбе с испарением. Уровень озера поддерживается путем насосной (4) перекачки в него воды из озера Севан, имеется также стоковая площадка (6).

Для натурных исследований Институт располагает различными плавучими средствами и оборудованием, (металлическая баржа, два буксирных катера БМК-90, деревянные и резиновые лодки, эхолот ПЭЛ-1), а также вибропоршневой буровой установкой, которой производится бурение скважин (5), как на озере так и при исследовании заиления водохранилищ.

ՀԻՊՈԹԵՆՐՈԿՏԻՎԱԿԱՆ ՈՒ ՀԻՊՐՈՏԵՆՆԻՎԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԶԱՐԿԱՅՈՒՄԸ ԶԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ-ՈՒՄ ԵՎ ԶՐԱ-ԷՆԵՐԳԵՏԻՎ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏԻ ՈՒ ԶՐԱՅԻՆ ՊՐՈՔԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏԻ ՊԱՏՄՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հիդրոշինարարությունը Հայկական ՍՍՌ-ում սկսել է զարգանալ դեռևս 1920-ական թվականներից, երբ սկիզբ դրվեց Շիրակի ջրանցքի ու Ձորագետ-դէսի շինարարությանը: Ծրագրված հիդրոտեխնիկական և հիդրոէներգետիկական շինարարությունների հետագա զարգացման ու շահագործման հարցերը պահանջում էին Հայաստանում ստեղծել գիտահետազոտական մի կենտրոն, որը գիտատեխնիկական հարցերի մշակումից բացի նպաստեր նաև տեխնիկական գիտությունների զարգացմանն ու ազգային բարձրորակ մասնագետների պատրաստմանը:

Սովետական Միության Գիտությունների ակադեմիայի Հայաստանի բաժանմունքում 1939 թ. կազմակերպված ջրա-էներգետիկ սեկտորը, շունենալով ոչ մի լաբորատոր բազա, չէր կարող բավարարել սեպուրելիկայի պահանջները: Այդ իսկ պատճառով 1943 թվին ՀՍՍՌ Գիտությունների ակադեմիա կազմակերպելիս հիշյալ սեկտորը վերանվանվեց Զրա-էներգետիկ ինստիտուտ. կառավարության որոշմամբ ակադեմիային հանձնարարվեց կազմակերպելու հիդրոէլեկտրիկ լաբորատորիա:

Ինստիտուտ և լաբորատորիա արագ ստեղծելու, նրանց հիմնական գիտահետազոտական աշխատանքները, պրոբլեմներն ու ուղղությունը որոշելու գործում խոշոր դեր խաղաց նրանց առաջին ղեկավարը՝ ՀՍՍՌ Գիտությունների ակադեմիայի ակադեմիկոս Ի. Վ. Եղիազարյանը, որը 1943 թ. կեննգրագից նրևան տեղափոխվելով իր հետ բերեց լաբորատորիայի հիմնական սարքավո-

րումները. Հափովդ սարբեր, դիտական արխիվ և, որ ամենակարևորն է, լաբորատոր աշխատանքի հարուստ փորձ:

Ի. Վ. Եղիազարյանը տեղի երիտասարդ կադրերից կազմակերպեց բարձր աշխատունակությամբ օժտված մի կոլեկտիվ, որը կարողացավ կարճ ժամանակամիջոցում ավարտել լաբորատորիայի շինարարությունը և սկսել իր դիտահետազոտական աշխատանքային գործունեությունը:

Այդ գործունեությունը ըստ իր թեմատիկայի ու զարգացման բաժանվում է չորս շրջանի:

Ջարգացման I շրջան (1944—1948 թթ.)

ՋէԻ-ի կազմում մտնում էին ջրատնտեսական պրոբլեմների, հիդրոէներգետիկայի, հիդրոլոգիայի և էլեկտրատեխնիկայի սեկտորները, իսկ ՀէԼ-ի կազմում՝ կառուցվածքների հիդրավլիկայի, հիդրոագրեգատների և հիդրոէներգոսիստեմների մոդելացման լաբորատորիաները:

Ինստիտուտը հիմնականում զբաղվում էր Սևան-Հրազդան-Արաքս պրոբլեմի մշակմամբ, իսկ լաբորատորիան՝ Գետառի հեղեղումների դեմ պայքարելու միջոցառումների հետազոտմամբ:

Լաբորատորիայում կառուցվեց Գետառի հունի մոդելը, որը հնարավորություն տվեց որոշելու գետի աղետային ելքը և ջրաբերունկների քանակը:

Այդ հետազոտությունները հնարավորություն տվեցին որոշելու նախատեսված կառուցվածքների և գետի հունի հաշվալին ելքը:

Ջարգացման II շրջան (1948—1959 թթ.)

1948 թ. ինստիտուտը և լաբորատորիան միանալով կազմեցին մեկ ընդհանուր Ջրաէներգետիկ ինստիտուտ, որից անջատվեց էլեկտրատեխնիկայի լաբորատորիան: Ինստիտուտի կազմում մտնում էին հիդրոէներգետիկայի, հիդրավլիկայի, հիդրոլոգիայի ու հիդրոմետեորոլոգիայի, հիդրոէներգոսիստեմների մոդելացման և դաշտային հետազոտությունների սեկտորներն ու լաբորատորիաները:

Կառավարության հանձնարարությամբ ինստիտուտը զբաղվում էր Սևանի ջրերի օգտագործման, ինչպես նաև Սևան-Հրազդան կասկադի կայանների աշխատանքային ուժի մեծության հարցերով: Բացի այդ, ինստիտուտը կազմեց փոքր և միջին գետերի էներգետիկ օգտագործման սխեման: Ինստիտուտի լաբորատորիաները զբաղվում էին կառուցվող կայանների առանձին կառուցվածքների մոդելային փորձարկումներով:

Այդ փորձարկումները հնարավորություն տվեցին ճշտելու նրանց չափերը և մշակելու մի շարք համապատասխան հաշվալին մեթոդներ:

Ստեղծվեց նաև հիդրոէներգոսիստեմների մոդելացման լաբորատորիան, որն զբաղվում է հիդրավլիկական մասի անցման պրոցեսների ուսումնասիրմամբ:

Կառավարության հանձնարարությամբ ինստիտուտը սկսեց մշակել Սևանում ջրի հորիզոնի մակարդակը բարձր պահելու և այլ գետերի ջրերը գնալ Սևան ուղղելու հարցերի մշակմամբ:

1957 թ. ինստիտուտը գլխավորում է տեխն. գիտ. գոկտոր-պրոֆեսոր Ա. Կ. Անանյանը, որի ղեկավարությամբ մշակված մի շարք հարցեր հիմք ծառայեցին կառավարության կողմից համապատասխան որոշում ընդունելու Սկանր պահանջելու վերաբերյալ:

Չարգացման III շրջան (1959—1961 թթ.)

Լներգետիկայի վերաբերյալ հարցերի ուսումնասիրությունը ընդլայնելու նպատակով ինստիտուտը համարվեց ջերմաէներգետիկայի հարցերով զբաղվող խմբով և հետանկարային էներգետիկայի սեկտորով: Այդ կապակցությամբ ինստիտուտը վերանվանվեց էներգետիկայի և հիդրավլիկայի ինստիտուտ: Ինստիտուտի հիմնական դործունեությունը ծավալվում էր Սկանի պրորլեմի նոր զբվածքի լուծման և հիմնավորման հարցերով:

Հետազոտության հիմնական արդյունքները, որոնք ամփոփված են ինստիտուտի եռհատորյա ժողովածուի մեջ, հետևյալն են՝ Սկանի մակարդակը իր սկզբնականի նկատմամբ կիջնի ընդամենը 20 մ, որից հետո նա կծառայի որպես ուղղման ու անդրկովկասյան միացյալ էներգոսխառեմի բաղմադարյան կանոնավորման ջրամբար: Բացի այդ, նախատեսվում է կառուցել մի շարք ջրամբարներ (Փասսախ, Հրազդան և այլ գետերի վրա), հարևան գետերի ջուրը ուղղել գետի Սկան և Արարատյան դաշտավայրի ստորերկրյա ջրերը օգտագործել ոռոգման նպատակով: Այդ միջոցառումները հնարավորություն են ընձեռում զգալիորեն փոքրացնել Սկանի ջրերի դարավոր պաշարներից բաց թողնվող ջրի ծավալը այնպես, որ լճի համար ստացվի նոր հավասարակշռված հորիզոն:

Բացի Սկանի պրորլեմից, ինստիտուտում շարունակվում էին անցյալում սկսված հիդրավլիկական և հիդրոդինամիկական հետազոտությունները՝ կապված ռեսպուբլիկայի ժողովրդական տնտեսության անհրաժեշտ հարցերի լուծման հետ:

Չարգացման IV շրջան (1961—1962 թթ.)

Ի կատարումն երկրի ջրային պաշարների պահպանման ու օգտագործման վերաբերյալ կառավարության ընդունած համապատասխան որոշման՝ էներգետիկայի վերաբերյալ նոր հարցերի մշակումը հանձնվեց էլեկտրատեխնիկայի ինստիտուտին՝ դարձնելով այն էներգետիկայի ինստիտուտ, իսկ էներգետիկայի և հիդրավլիկայի ինստիտուտը վերանվանվեց «Ջրային պրորլեմների ինստիտուտ» (ՋՊԻ):

Այդ կապակցությամբ ինստիտուտում վերակազմվեցին և կազմակերպվեցին հետևյալ սեկտորներն ու լաբորատորիաները՝ Ջրային պաշարների կոմպլեկտային օգտագործման, մետեորոլոգիայի և հիդրոլոգիայի, կիրառական հիդրոդինամիկայի, հիդրոագրեգատների մոդելացման, չափողական ու հաշվողական տեխնիկայի, ստորերկրյա ջրերի և բնական հետազոտությունների:

Ինստիտուտի հիմնական խնդիրներն են՝ մշակել ռեսպուբլիկայի ջրային պաշարների կոմպլեքսային օգտագործման, միացյալ ջրային սխառեմներ ստեղծելու ու կառավարելու համար անհրաժեշտ գիտական հիմքեր: Հիդրո-

իներգոսիտեմի, հիդրավլիկական հետազոտությունների, հիդրոմետեորոգիայի, արդյունաբերության ջրամատակարարման, ջրահեռացման, ջրամաքրման և այլ հարցերի հետազոտություններ: Պայքար ջրագուրչիացման դեմ ջրի նոր ռեսուրսների հայտնաբերման նպատակով և Խրարատյան դաշտավայրի ստորերկրյա ջրերի օգտագործման միջոցառումների մշակումը, ինչպես նաև հեռանկարային ջրային և ջրատնտեսական հաշվեկշռի կազմումը:

И. В. ЕГИАЗАРОВ

ДВИЖЕНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ ПО КРУПНОСТИ СМЕСИ НАНОСОВ

В статье рассматривается определение коэффициента сопротивления подвижного зернистого русла и расхода влекомых наносов для смесей неоднородных по крупности.

Критическая удельная сила влечения (или касательное напряжение трогания) может быть выражено формулой [1]:

$$\tau_0 = f_0 (\gamma_g - \gamma) \alpha, \quad (1)$$

где f_0 — коэффициент сопротивления подвижного русла.

Та же величина может быть описана выражением [2]:

$$\tau_0 = \gamma h_0 i, \quad (2)$$

где h_0 — глубина потока при трогании.

Дюбуа показал, что для галечного русла $f_0 = \text{const}$. Это постоянство впоследствии было подтверждено опытами Крея [3] и более поздними исследованиями. Но такое постоянство f_0 относится только к автомодельной зоне полной турбулентности и к однородным по крупности наносам.

Шильдс [4] исходя из полуэмпирической теории турбулентного потока, на базе теории подобия дал качественный анализ изменчивости f_0 в турбулентной переходной зоне и экспериментально полученную зависимость

$$f_0 = \varphi(Re_{o,d}) = \varphi\left(\frac{d}{\delta}\right),$$

$$\text{где } Re_{o,d} = \frac{v_{o*} \cdot d}{\gamma} \sim \frac{d}{\delta}.$$

Шильдс экспериментально показал, что существуют две переходные зоны; турбулентная шероховатая и турбулентная гладкая при этом f_0 при переходе от гладкой к шероховатой зоне имеет минимум равный 0,03 и достигает 0,06 для автомодельной зоны полной турбулентности.

Экспериментальные данные Шильдса были впоследствии дополнены Шокличем [5], Тизоном [6], [7] и автором статьи [8]. Эти дополнительные данные показали, что минимум f_0 лежит ниже и может

приблизиться к 0,01 [5, 8] для сферических частиц однородной крупности.

Как будет видно ниже влияние неоднородности частиц по крупности заметно и даже сильно отражается на величине f_0 .

§ 1. Движение однородных по крупности наносов и коэффициент подвижного сопротивления

В 1954 г. автору удалось дать теоретическое определение величины f_0 [8] и в ряде последующих статей [12], для однородных по крупности сферических частиц. Теоретическое решение задачи о величине f_0 было проведено автором исходя из условия предельного равновесия зерна и из необходимости *одновременно* удовлетворить условиям (1) и (2).

Это условие предельного равновесия привело для сфер еще не оторвавшихся от дна (защемленных, но не связных), с учетом влияния подъемной силы, к выражению [8]:

$$f_0 = \frac{2}{3} \frac{f_0^*}{1 + f_0^* \frac{C_{oy}}{C_{ox}}} \cdot \frac{\lambda_0}{C_{ox} r_0^2}, \quad (3)$$

где f_0^* — коэффициент трения для защемленных частиц, меньший единицы, $\lambda_0 = \frac{u_{od}}{u_0}$ коэффициент перехода от средней скорости к донной, а λ_0 — обычный коэффициент гидравлического сопротивления.

Но такие условия равновесия не отвечают условиям трогания частиц, так как после дилатации зернистого слоя [12], сальтируя, частица перемещается не вдоль, а поперек потока, и лишь потеряв контакт с зернистым руслом и миновав пределы большого градиента скоростей у дна, постепенно переходит к движению в направлении потока. Эта концепция автора подтверждена опытами Бегнольда [9, 10], Данеля, Дюрана и Кондолиоса [11], и многих последующих исследователей определивших траектории частиц при их скачкообразном переносе потоком. Эта же особенность условий трогания приводит к тому, что условия предельного равновесия частицы в продольном равномерном потоке получаются такими же как для частицы падающей равномерно в покоящейся жидкости, и следовательно приводит к равенству продольной скорости потока трогания у частицы u_{od} и скорости падения частицы или иначе гидравлической крупности σ :

$$u_{od} = \sigma. \quad (4)$$

Этот чрезвычайно существенный результат был получен автором и в результате цифровых расчетов f_0 по уравнению (5) с одновременным соблюдением условий (1) и (2) — [8, 12].

В этих условиях трогания вдоль потока, коэффициент трения f_0 становится равным единице, а влияние подъемной силы, т. е. коэффициента сопротивления C_y практически исчезает [8 и 11].

Поэтому для условий трогания

$$f_0 = \frac{2}{3} \frac{\lambda_0}{C_{0,x=0}}. \quad (5)$$

Так как $C_{0,x} = \varphi(Re_{od})$, то теоретически строго установлено влияние числа Рейнольдса и изменяемости f_0 в переходной турбулентной зоне, а также установлено наличие ламинарной автомодельной зоны [8].

Числовой коэффициент $\frac{2}{3}$ уравнения (5) связан с формой зерна и верен только для сфер.

Необходимость определения распределения скорости по глубине $u(y)$ и определения средней скорости ($\bar{u}$) для получения ζ , входящего в уравнение (5), а также определения $Re_d = \frac{u_d \cdot d}{\nu}$, по которому определяется по известной опытной кривой $C_x = \varphi(Re_d)$, приводит к некоторому нарушению строгости теоретического расчета при вычислении f_0 . Для определения (u_{od}) у зерна и $\bar{u}(y)$ приходится пользоваться существующей теорией турбулентного потока Прандтля—Кáрманна, а для переходной зоны также эмпирическим дополнением Кеулегиана—Эйнштейна [13]. Эта теория является хотя и общепринятой, но ее основа полутеоретическая. Несмотря на это мы будем называть такой расчёт величин f_0 теоретическим.

Используемые уравнения имеют следующий вид для условий трогания, которые отмечаются индексом поль:

$$u_{0y} = v_0 \cdot 5,75 \lg 30,2 \frac{y}{k} x \quad (6)$$

$$\bar{u}_0 = v_0 \cdot 5,75 \lg 12,3 \frac{h_0}{k} x, \quad (7)$$

где k — величина определяющих шероховатость выступов, а x — корректив Кеулегиана—Эйнштейна, больший единицы для переходной зоны неполной турбулентности. Уравнение (6) является хорошо известной логарифмикой, которую не следует доводить до дна, так как в придонном слое $u(y)$ следует считать линейным, что давно получило признание, и что избавляет от противоречий в окрестности $y = 0$.

В силу (6) и (7) и принятых обозначений:

$$\zeta_0 = \frac{\lg 30,2 \frac{y}{k} x}{\lg 12,3 \frac{h_0}{k} x}. \quad (8)$$

Для зоны полной турбулентности, когда $x = 1,0$ и для однородных по крупности наносов, когда $y = ak$ (9), (a — постоянная) на основании (8) получим:

$$\tau_0 = \frac{\text{const}}{\lg 12,3 \frac{h_0}{k}} \quad (10)$$

Необходимо несколько остановиться на зависимости (9) определяющей точку приложения гидродинамического воздействия на зерно.

Для отдельной сферы с диаметром (k), на гладкой поверхности дна можно было бы считать $a = 0,5$ (центр тяжести). Но для однородной совокупности сфер, а тем более неоднородной по крупности смеси сфер эта точка должна лежать выше.

Так как даже для однородной равнотернистой среды величина a может быть определена только статистически, эта величина должна быть установлена исходя из опытных данных. В дополнение к этим соображениям используем то обстоятельство, что f_0 является константой в автомодельной зоне полной турбулентности и равно 0,06. При теоретическом вычислении f_0 величина a влияет на эту константу, f_0 получается равным 0,06, если $a = 0,63$.

При этом

$$\tau_0 = \frac{1,28}{\lg 12,3 \frac{h_0}{k}} \quad (11)$$

и из уравнения (6) $u_{0k}/u_{0*} = 7,35$. Это цифровое отношение уже получило признание.

Это же соотношение получим для $\frac{\sigma}{v_{0*}} = \sqrt{\frac{4}{3 C_{0*} f_0}} = 7,35$ при $C_{0x} = 0,4$ и $f_0 = 0,06$. Таким образом приходим к тому же уравнению (4).

При $y = 0,63 k$, наложение вычисленных теоретически величин u_{0k} на обычную известную опытную кривую $\sigma(k)$ для сфер приводит к полному совпадению, которое было отмечено и в [12], что также подтверждает равенство $u_{0k} = \sigma$ (4).

Существенно, что по расчетам автора равенство (4) не зависит от того какое значение принято для a и какой принят закон для $u(y)$, логарифмический или степенный. В силу (5) и (6) и принятых выше обозначений т. к.

$$\lambda_0 = 2 \left(\frac{u_{0*}}{u_0} \right)^2 \quad (12)$$

исключив u_0 получим:

$$\frac{\lambda_0}{\tau_0^2} = \frac{0,06}{|\lg 19 x|^2} \quad (13)$$

Для автомодельной зоны $\frac{\lambda_0}{\tau_0^2} = 0,365 = \text{const}$, и так как $C_{0x} = 0,4$, то

$$f_0 = \frac{2}{3} \frac{0,365}{C_{0x}} = 0,06 = \text{const}.$$

Пользуясь уравнениями (1) и (2) можно по полученному значению f_0 при заданных d и $(\gamma_g - \gamma)$ определить τ_0 , а по τ_0 и уравнению (2) определить h_0 и $v_{0*} = \sqrt{g h_0 i}$ при заданном i , а следовательно и $Re_{0*} = \frac{v_{0*} \cdot k}{\nu} \sim \frac{k}{\delta}$.

Отсюда следует, что для условий трогания, при заданных k , i и $\gamma_g - \gamma$, только одно значение f_0 , h_0 и v_{0*} может удовлетворить условиям (1) и (2) и нельзя искать величину f_0 для произвольных значений глубины h , так как не может быть многозначного решения ошибочно полученного Никитиным [14] и Бодряшкиным [15], хотя качественный характер изменения f_0 , т. е. уменьшение в гладкой зоне, подъём в переходной шероховатой зоне, и постоянство в автомодельной зоне определены ими правильно. Приведенное выше определение f_0 без повторных расчётов и последовательных приближений возможно для автомодельной зоны, пока можно считать $C_{ox} = 0,4$ и следовательно для $Re_d > 1500$ и $x = 1,0$, т. е. для $\frac{k}{\delta} > 8 \div 10$. В переходной шероховатой зоне приходится идти несколькими приближениями, задавая h_0 , а затем определив f_0 проверять удовлетворение обоих уравнений (1) и (2) и повторять расчет до схождения величин h_0 . Только такое значение величины h_0 будет правильно и связь f_0 и h_0 будет и должна быть однозначна.

§ 2. Переход от однородных к неоднородным по крупности сферическим наносам (смесям)

Рассматривая совокупность сфер однородной крупности, в § 1 было принято обозначение k для диаметра сфер, отвечающее обозначению величин выступов шероховатости для слоя подстилающего движущий слой с сферами крупностью d , того же размера, т. е. в § 1 исследование проведено при $d = k$. Переходя к смесям необходимо считаться с тем, что $d \neq k$. Поэтому уравнение (9) преобразуется в

$$y = ad. \quad (14)$$

Соответственно уравнение (6) для автомодельной зоны ($x = 1,0$), примет вид:

$$u_{0d/k} = v_{0*} 5,75 \lg 30,2 a \frac{d}{k}. \quad (15)$$

Уравнение (13) преобразуется в

$$\frac{\lambda_0}{\zeta_0^2} = \frac{0,06}{\left[\lg 19 \frac{d}{k} \right]^2}. \quad (16)$$

Следовательно, для автомодельной зоны

$$f_0 = \frac{0,1}{\left[\lg 19 \frac{d}{k} \right]^2}. \quad (17)$$

получился существенно новый результат. Величина коэффициента сопротивления тем меньше, чем больше отношение d/k , т. е. отдельные фракции смеси обладают большей подвижностью, чем те же фракции в однородной зернистой среде, а следовательно и расход наносов для этих фракций в смеси будет больше чем для однородных наносов.

Для заданного отношения d/k коэффициент f_0 будет постоянной величиной. Например, при $d/k = 5$ по уравнению (17) для автомодельной зоны получается $f_0 = 0,025$. Так как шероховатость, а следовательно и (u_{0d}) определяется крупными фракциями смеси, то для смесей граница автомодельной зоны (полная турбулентность обтекания зерен) сдвигается влево к меньшим величинам $Re_{0,d}$, чем для однородных по крупности зерен (для которых автомодельное $Re_{0,d} > 1000$). Произведенные расчеты по определению u_{0d}/k показали, что и для смесей $u_{0d}/k = \sigma$ и полностью ложатся на кривую $\sigma(d)$ для сфер.

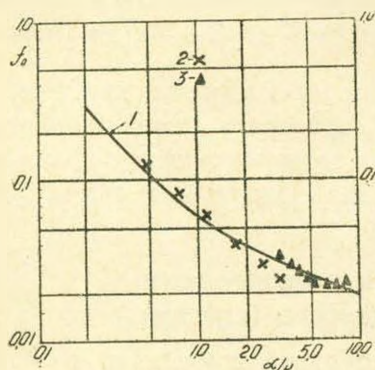


Рис. 1. 1. Теоретическая кривая
2. Лабораторные опыты Пантелопулоса.
3. Натурные опыты Умарова на р. Каранкуль.

На рис. 1 показана теоретическая кривая $f_0 = \varphi(d/k)$, вычисленная по уравнению (17). Крестиками там же показаны экспериментальные результаты Пантелопулоса-Прага [16], а треугольниками натурные данные по измерениям Умарова [17] на р. Каранкуль. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретической кривой и подтверждают теорию, отраженную уравнением (17). Полученная зависимость (17) для f_0 дает возможность определения для смесей содержания наносов при заданных h и i по формуле автора [8, 12, 18]:

$$p'' = V \sqrt{i} K \left(\frac{hi}{f_0 d} - 1 \right), \quad (18)$$

а следовательно и определения расхода наносов для смесей (в весе под водой), так как

$$g'' = \gamma q p''. \quad (19)$$

Ввиду того, что часто применяя уравнение (18) ошибочно считают, что оно дает только расход донных наносов, еще раз отмечается, что уравнение (18) относится к полному расходу наносов как донному, так и взвешенному, за исключением мелких фракций (меньше 0,5 мм), которые Эйнштейн [13] называет wash load, которые идут транзитом и не оседают на дно. Для наносов несферической формы зерен ведется исследование по разработке всех вопросов затронутых в данной статье. Условия равновесия приводят для несферических зерен к иному коэффициенту формы, чем цифровая величина 2/3 в уравнении (5). Ведется также исследование гранулометрической кривой смеси наносов для уточнения определения величин d_{max} , d_{cp} и k .

§ 3. Заключение

Недостаточность натуральных данных приводила до сих пор к тому, что делались попытки, как у нас так и за рубежом, апробировать применение той или иной формулы для расчета расхода наносов не сравнением с действительностью, натурой, а сравнением формул друг с другом, по цифровым количественным результатам.

Получались большие цифровые расхождения, как потому, что это присуще допущениям принятым тем или иным автором, так и потому, что использующие формулы для расчета часто ошибочно считают, что уравнения автора, Гончарова и ряд зарубежных формул, относятся только к влекомым донным, наносам. Большинство существующих формул охватывают и донные и взвешенные наносы и поэтому необходима разработка методов расчета по выделению из общего расхода наносов его составных частей.

Такое разделение возможно с использованием полученных на теоретической основе Эйнштейном (13) функций J_1 и J_2 , или с использованием обработанных автором данных опытов Лаурсена, дающих зависимость процента взвешенных наносов от полного их расхода в функции от отношения v_* к гидравлической крупности Q .

Отсутствие необходимых натуральных данных для возможности сравнения предложенных методов расчета расхода наносов (широко проверенных только по лабораторным исследованиям в лотках) с действительностью объясняется тем, что измерения ловушками влекомых наносов дают недоброкачественные результаты, а обычные измерения взвешенных наносов в реках не охватывают нижних наиболее насыщенных слоев потока.

Единственным способом измерений в натуре, который может дать надежные результаты является объемный метод, по отложению наносов во всякого типа водоемах, и по одновременным измерениям гидравлических параметров русла питающего водоем. Таких полноценных хотя и довольно грубых измерений известно автору только два: на реке Каранкуль (Узбекистан) с устройством специального отстойника, и на р. Монеи-Крик с отложениями в озере Блумингтон (США).

Разумеется нужно всячески расширять и множить исследования по объемному способу определения расхода наносов.

По этому вопросу на V конференции по селевым паводкам (октябрь 1962 г. Баку) автор обратился к участникам Конференции, а также к ряду Институтов, с призывом увеличить число таких исследований и усовершенствовать их методы.

Но пока еще нет этих новых данных, необходимо все существующие методы расчета проверить по имеющимся данным на р. Каранкуль и Монеи-Крик.

Поступило 25.11. 1963

Ի. Վ. ԵԳԻԱԶԱՐՈՎ

ՄԵԾՈՒԹՅԱՄԲ ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ԶՐԱՐԵՐՈՒԿՆԵՐԻ ԽԱՌՆՈՒՐԳԻ ՇԱՐԺՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգվածում գիտված է մեծությունը միատարր սֆերիկ ջրաբերական համար կրիտիկական շոշափող լարման $\tau_0 = f_0(\gamma_k - \gamma)d$ բանաձևի մեջ մտնող գիմադրություն f_0 գործակցի տեսական որոշումը: Յուրյ է արված, որ f_0 կարող է արտահայտվել (5) բանաձևով, ինչպես և համաձայն հեղինակի կողմից ընդունված և նախկինում հրատարակված [8, 12] տեղաշարժման պայմանին վերաբերող կոնցեպցիաների, հոսանքի սկզբնական հատակային արագությունը հատիկի մոտ հավասար է նրա հիդրավլիկական խոշորությունը: Լկր պայմանների դեպքում ավտոմոբիլային զոնայի համար $f_0 = 0,08 = \text{const}$:

Հիմնվելով վերջինիս վրա անհամասեռ մեծության ջրաբերականի խառնուրդի համար f_0 որոշման կապակցությունը անցում է կատարված և տեսականորեն ստացված է (17) հավասարումը, որը կապ է հաստատում $f_0 = \varphi\left(\frac{d}{k}\right)$, որտեղ d -ն խառնուրդի գիմադր ֆրակցիան է, իսկ k -ն խորդուրդությունը որոշող նույն ալդ խառնուրդի խոշորությունն է:

(17) բանաձևը այն կարակացությունն է բերում, որ համասեռների հետ համեմատած խառնուրդի մեջ գտնվող ջրաբերականի ֆրակցիայի համար f_0 մեծությունը բավականին փոքրանում է:

Սառնուրդների համար նույնպես ստացված է, որ հոսանքի սկզբնական հատակային արագությունը հատիկի մոտ հավասար է նրա հիդրավլիկական խոշորությունը:

Գծադիր 1-ում բերված են ըստ (17) բանաձևի $f_0 = \varphi\left(\frac{d}{k}\right)$ տեսական կորը, որտեղ խաչերով ցույց են արված Պանսկոպուլոսի (16) լաբորատորիայի էքսպերիմենտալ կորերը, իսկ եռանկյուններով՝ Կարանիուլ գետի վրա բնական փորձերից Ումարովի [17] չափումներով արված կետերը: Հաջող համընկնում հաստատում է շարադրված տեսությունը և (17) բանաձևը:

f_0 -ի տեսական հաշվման հնարավորությունը բերում է հեղինակի կողմից խառնուրդների համար ջրաբերականի պարունակություն և ծախսի որոշման հնարավորությունը (18) և (19) բանաձևերով:

I. EGIAZAROFF

Member of the Armenian Academy of Sciences and corresp. member
of the Toulouse (France) Academy of Sciences

MOVEMENT OF LARGE RANGE MIXTURES OF SEDIMENTS

Theoretical determination of the coefficient of resistance of a movable granular bed and of sediment discharge rate for great range mixtures.

In the paper it is shown theoretically that the coefficient (f_0) of equation $\tau_0 = f_0(\gamma_k - \gamma)d$ for the critical tractive force can be represented by eq (5); that for the formerly published [8, 12] authors conception concerning the conditions of incipient motion (sediment movement threshold

the critical threshold velocity of the fluid at the particle is equal to the fall velocity σ of the same particle.

These conditions give for homogeneous sediments (not mixtures) the value of $f_0 = 0,06$ stated experimentally by Schields [4] and others [5-8].

Using the mentioned theoretical results a transition to unhomogeneous mixtures was made, and eq. (17) was derived, which gives

$f_0 = \varphi\left(\frac{d}{k}\right)$, where (d) is the moving sediment diameter in a mixture,

and (k) the size of sediment underlying that of d and determining the bed rugosity. Eq (17) shows that f_0 is considerably decreasing with increase of d/k if compared with homogeneous granular bed.

The theoretical calculations for mixtures show also that the critical fluid velocity at the particle is equal to the fall velocity of that particle.

On fig. 1 the theoretical curve $f_0 = \varphi(d/k)$ is presented, and experimental points are shown (crosses) for laboratory experiments of Pantelopulos [16] and triangles for filed measurements on river Karankul by Umarov [17]. Experimental points of both series give satisfactory results for the theoretical curve, and for the presented theory.

The possibility of theoretical calculations of (f_0) gives the possibility of theoretical calculation of the sediment concentration by the authors [18] equation (18) and of the rate of sediment discharge by eq. (19), for great range mixtures.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Du Boys M. P. Etude du regime du Rhone. Annales des ponts et chaussées. 1879, pp. 141-195.
2. Dubuat E. Principes d'hydraulique. Paris, 1786, 1816.
3. Krey H. D. Modelversuche für einen geschiebeführenden fluss. Berlin, 1935.
4. Schields A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Heft 26, 1936. Mitteil. der Versuchsanstalt für Wasserbau. Berlin.
5. Schoklitsch A. Berechnung der Geschiebefracht. „Wasser und Energiewirtschaft“, 1949, № 1.
6. Tison L. J. Transport des materiaux de fond. 2-me Congres AIRH 1948, Stockholm.
7. Tison L. J. Recherchas sur la tension limite d'entrainement. 5-me Congrès AIRH, 1953, Minesota.
8. Егуазаров И. В. Транспортирующая способность открытых потоков. Известия ОН АН СССР, № 2, 1956; Eguiasarof I. L'equation générale du transport des alluvions non cohesives par un courant fluide. Proc. 7-th Congress IAHR, 1957. Lisbon.
9. Bagnold R. Some flume experiments on large grains. Proc. Institution of Civil Engineers. London, April, 1935.
10. Bagnold R. Physics of blown sand. London, Methuen, 1941, 1954.
11. Danel P., Durand R. et Condolios E. Houille Blanche, 1951, № B, 1953, № 2, 6 A; 2-me journée de l'hydraulique 1952; Proc. IAHR 1951, Bombay and 1953, Minesota.

12. *Егизаров И. В.* К решению задачи о транспорте несвязных наносов любых фракций с учетом влияния их концентрации в слое придонной мутности. Известия ОН СССР, Энергетика, 1959, № 5. *Eguizaroff I.* Calcul du debit solide et influence de la couche de grande concentration du fond. Houille Blanche, 1959, № 3.
13. *Einstein H. A.* The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Techn. Bull. U. S. D-t of agriculture, № 1026, 1950.
14. *Никитин И. К.* О зависимости неразмывающей скорости от диаметра частиц наносов и глубины потока. ДАН УзССР, 1955, № 1; Структура турбулентного потока и вопросы моделирования. Сб. Руслловые процессы и гидротехническое строительство. Изд. УзБАН, 1955.
15. *Бодряшкин.* Лабораторное исследование начальной силы влечения и критической скорости. Тр. „САНИИРИ“, 1957, вып. 87; Критическая величина силы влечения потока. Автореферат канд. диссертации, 1958.
16. *Pantelopulos J.* Etude experimentale du mouvement par charriage de fond d'un melange des materiaux. Proc. 7-th Congress IAHR, D—30, 1957, Lisbon.
17. *Умаров А. Ю.* Наносный режим р. Каракуль. Сборник „Вопросы энергетики, гидротехники, горного дела“, 1961. Изд. АН УзССР.
18. *Егизаров И. В.* Расход влекомых потоком наносов. Известия АН АрмССР, 1949, № 5.

ГИДРАВЛИКА

В. Г. САНОЯН

О ВЗВЕШИВАНИИ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ
ТРУБЕ

Гидротранспорт зернистых материалов имеет большое практическое значение. Частным случаем гидротранспорта в вертикальной трубе является взвешивание зернистого слоя в восходящем потоке. Этот вопрос имеет практическое значение также для ряда отраслей техники, в том числе для водоснабжения при промывке водоочистных фильтров. Ниже делается попытка теоретического решения задачи, используя основные законы механики и не делая пока никаких допущений.

Ф. И. Франклем [1] были получены дифференциальные уравнения движения двухкомпонентных потоков. При выводе этих уравнений он использовал теорию количеств движения в Эйлеровском представлении. Те же уравнения в векторном виде можно получить применяя теорему об изменении количества движения в обычном виде (приравнявая индивидуальную производную по времени от главного вектора количеств движения главному вектору внешних массовых и поверхностных сил). Этот вывод здесь не приводится. Напишем уравнения для твердой компоненты

$$\rho_s \frac{\partial s \vec{V}}{\partial t} + \rho_s (\Delta \cdot \vec{V}) s \vec{V} = \rho_s s \vec{F} - s \operatorname{Div} P \quad (1)$$

и для жидкой компоненты

$$\rho \frac{\partial (1-s) \vec{V}}{\partial t} + \rho (\Delta \cdot \vec{V}) (1-s) \vec{V} = \rho (1-s) \vec{F} - (1-s) \operatorname{Div} P. \quad (2)$$

К ним присоединяются уравнения неразрывности

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} (s \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

для твердой компоненты, и

$$\frac{\partial (1-s)}{\partial t} \operatorname{div} (1-s) \vec{V} = 0 \quad (4)$$

для жидкой компоненты.

Уравнения (1)–(4) относятся к мгновенным значениям величин. При этом приняты следующие обозначения

t — время; ρ_s и ρ — плотности соответственно твердых и жидких частиц; $\vec{V}$ — вектор мгновенной скорости жидких и твердых частиц*; $\vec{P}$ — тензор напряжения — интенсивность объемного действия поверхностных сил; $\vec{F}$ — интенсивность массовых сил; s — функция, равна 1 внутри твердых частиц и 0 внутри жидких;

$$\Delta \equiv \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}.$$

Уравнения (1)–(4) выполнены как внутри твердых, так и внутри жидких частиц [2]. В самом деле, (1) и (3) выполнены внутри твердых частиц ($s=1$) на основании общих законов механики сплошной среды, а внутри жидкости потому, что там $s=0$. Уравнения (2) и (4) выполнены внутри жидких частиц согласно общим законам механики сплошной среды, а внутри твердых частиц потому, что там $1-s=0$.

Подставив в уравнение (1) $(\Delta \cdot \vec{V}) s \vec{V} = \text{Div} (\vec{V} \vec{V}) s$ и осреднив (1) и (3) по объему, занятому твердыми частицами согласно формуле

$$f_s = \frac{\bar{f} \cdot \bar{s}}{\bar{s}}$$

получим

$$\rho_s \frac{\partial s \vec{V}_s}{\partial t} + \rho_s \cdot \text{Div} \bar{s} (\vec{V}_s \vec{V}_s) - \bar{s} \text{Div} \bar{P} - \overline{s' \text{Div} P'} - \rho_s \bar{s} \vec{F}_s = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \text{div} (\bar{s} \vec{V}_s) = 0, \quad (6)$$

где $s' = s - \bar{s}$, $P' = P - \bar{P}$.

В написанных выражениях черточки сверху обозначают знак осреднения; $\bar{s}$ — представляет собой мутность в данной точке.

Аналогичным образом, заменяя $(\Delta \cdot \vec{V}) (1-s) \vec{V} = \text{Div} (\vec{V} \vec{V}) (1-s)$ и осредняя уравнения (2) и (4) по объему, занятому жидким веществом согласно формуле

$$f = \frac{\bar{f} (1-\bar{s})}{1-\bar{s}},$$

и не меняя обозначение скорости, получим

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial (1-\bar{s}) \vec{V}}{\partial t} + \rho \text{Div} (1-\bar{s}) (\vec{V} \vec{V}) - (1-\bar{s}) \text{Div} \bar{P} + \\ + \overline{s' \text{Div} P'} - (1-\bar{s}) \vec{F} = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

* В силу прилипания жидкости к твердым частицам для скорости $\vec{V}$ мы будем иметь векторное поле.

$$\frac{\partial (1-\bar{s})}{\partial t} - \operatorname{div}(1-\bar{s}) \vec{V} = 0. \quad (8)$$

В уравнениях (5)–(8), величина $\overline{s' \operatorname{Div} P'} = \vec{R}$, представляет собой интенсивность распределения сопротивления, испытываемого твердой компонентой и эта величина входит в уравнения (5) и (7) с противоположным знаком.

Воспользуемся обобщенным законом Ньютона о линейной связи между тензором напряжений P и тензором скоростей деформации S , предполагая, что и твердые частицы и жидкость несжимаемы. Тогда

$$P = 2\mu S + p \cdot E, \quad (9)$$

где μ — коэффициент вязкости, p — давление, E — единичный тензор.

Аналитически это выражается формулой:

$$P_{ij} = \begin{cases} \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) & \text{при } j \neq i, \\ -p + 2\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_i} & \text{при } j = i. \end{cases} \quad (10)$$

Подстановка (10) в (5) и (8) приводит к системе, состоящей из двух векторных и двух скалярных уравнений или, что то же самое, из восьми скалярных уравнений. Неизвестными будут

$$\vec{V}_s, \vec{V}, p, \bar{s} \text{ и } \vec{R}.$$

Напишем уравнение движения (5) и (7) в координатной форме, обозначая проекции скоростей твердых и жидких частиц соответственно через u_x, u_y, u_z и v_x, v_y, v_z :

$$\begin{aligned} \rho_s \left(\frac{\partial s u_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} s u_x u_x + \frac{\partial}{\partial y} s u_y u_x + \frac{\partial}{\partial z} s u_z u_x \right) &= \\ &= s \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z} \right) + R_x + R_s s F_x; \\ \rho_s \left(\frac{\partial s u_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} s u_x u_y + \frac{\partial}{\partial y} s u_y u_y + \frac{\partial}{\partial z} s u_z u_y \right) &= \\ &= s \left(\frac{\partial p_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial z} \right) + \rho_s s F_y + R_y; \\ \rho_s \left(\frac{\partial s u_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} s u_x u_z + \frac{\partial}{\partial y} s u_y u_z + \frac{\partial}{\partial z} s u_z u_z \right) &= \\ &= s \left(\frac{\partial p_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right) + \rho_s s F_z + R_z, \end{aligned} \quad (11)$$

для твердой компоненты,

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (1-s) v_x + \frac{\partial}{\partial x} (1-s) v_x v_x + \frac{\partial}{\partial y} (1-s) v_y v_x + \frac{\partial}{\partial z} (1-s) v_z v_x \right] =$$

$$= (1-s) \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \right) + \rho_s s F_x - R_x;$$

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (1-s) v_y + \frac{\partial}{\partial x} (1-s) v_y v_x + \frac{\partial}{\partial y} (1-s) v_y v_y + \frac{\partial}{\partial z} (1-s) v_y v_z \right] =$$

$$= (1-s) \left(\frac{\partial p_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial z} \right) + \rho_s s F_y - R_y;$$

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (1-s) v_z + \frac{\partial}{\partial x} (1-s) v_z v_x + \frac{\partial}{\partial y} (1-s) v_z v_y + \frac{\partial}{\partial z} (1-s) v_z v_z \right] =$$

$$= (1-s) \left(\frac{\partial p_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right) + \rho_s s F_z - R_z. \quad (12)$$

для жидкой компоненты.

Уравнения неразрывности: для твердой компоненты,

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s u_x}{\partial x} + \frac{\partial s u_y}{\partial y} + \frac{\partial s u_z}{\partial z} = 0; \quad (13)$$

для жидкой компоненты

$$\frac{\partial (1-s)}{\partial t} + \frac{\partial (1-s) u_x}{\partial x} + \frac{\partial (1-s) u_y}{\partial y} + \frac{\partial (1-s) u_z}{\partial z} = 0. \quad (14)$$

Приводим решение для простейшего случая, когда имеем стационарное движение двухкомпонентного восходящего или нисходящего потока в вертикальной трубе. Направляя ось z вертикально вверх, а x и y по диаметральному сечению трубы (рис. 1) будем иметь:

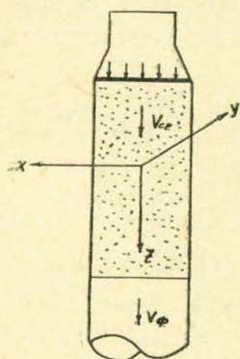


Рис. 1.

$$F_x = F_y = 0, \quad F_z = -g,$$

$$p_{xx} = p_{yy} = p_{zz} = -p$$

Кроме того примем, что внутри твердых частиц касательные напряжения равны нулю:

$$p_{xy} = p_{zz} = p_{yz} = 0.$$

Тогда система (11) примет вид:

$$R_x - s \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$

$$R_y - s \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad R_z - s \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_s s g = 0. \quad (15)$$

Уравнение неразрывности (13) превращается в тождество. Внутри жидких частиц имеем

$$p_{xx} = p_{yy} = p_{zz} = -p, \quad p_{yx} = p_{xy} = 0;$$

$$p_{yz} = p_{zy} = \mu \frac{\partial v_z}{\partial y}, \quad p_{xz} = p_{zx} = \mu \frac{\partial v_z}{\partial x}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{yz}}{\partial z} &= \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial p_{zx}}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_z}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя эти выражения в (12), получим следующую систему:

$$\begin{aligned} R_x + (1-s) \frac{\partial p}{\partial x} &= 0; \\ R_y + (1-s) \frac{\partial p}{\partial y} &= 0; \\ R_z - (1-s) \left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \right] + \rho (1-s) g &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Вычитая первые два уравнения из системы (15) и (17) получим:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (18)$$

Вычитание вторых уравнений той же системы дает

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (19)$$

Из (18) и (19) вытекает, что

$$p = p(z) \quad (20)$$

Иначе говоря, в рассматриваемом случае давление по сечению не меняется.

Исключая из третьих уравнений системы (15) и (17) неизвестную R_z , получим:

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = \frac{1}{(1-s)\mu} \left(\rho_s s g + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho (1-s) g \right). \quad (21)$$

Опыты показывают, что мутность при одинаковых размерах твердых частиц по сечению трубы не меняется ($s = \text{const}$). Это может случиться только тогда, когда обе части уравнения постоянны.

Поэтому из (21) получим:

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = \text{const} = C; \quad (22)$$

$$\frac{1}{\mu(1-s)} \left[\rho_s s g + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho (1-s) g \right] = C. \quad (23)$$

Решение (22) дает

$$v_z = -\frac{C}{4} (a^2 - r^2) \quad (r = \sqrt{x^2 + y^2}), \quad (24)$$

где a — радиус трубы.

Определим среднюю скорость

$$v_{cp} = \frac{1}{\pi a^2 (1-s)} \int_0^a 2\pi r (1-s) v_z dr = -\frac{Ca^2}{8}. \quad (25)$$

Отсюда

$$C = -\frac{8v_{cp}}{a^2}. \quad (26)$$

Уравнение (23) можно представить в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = -(\rho_s - \rho) sg + C\mu (1-s). \quad (27)$$

Подставляя значение C из (26) получим

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) = (\rho_s - \rho) sg + \frac{8\mu (1-s) v_{cp}}{a^2}. \quad (28)$$

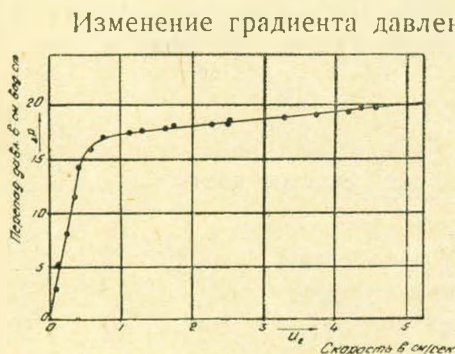


Рис. 2.

Изменение градиента давления от скорости показано на графике рис. 2, который заимствован из работы [3], где в наших обозначениях $\Delta p = -\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) U_s \equiv v_{cp}$.

Как видно из графика, начиная с точки с которой имеет место полное взвешивание твердых частиц, градиент давления в зависимости от скорости меняется линейно, в согласии с формулой ((28).

Замечая, что

$$v_{cp} = (1-s) v^\Phi,$$

где $v^\Phi = \frac{Q}{\pi a^2}$ — скорость фильтрации, уравнение (27) приводим к виду:

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) = (\rho_s - \rho) sg + \frac{8\mu v^\Phi}{a^2}. \quad (29)$$

В исследованиях обычно не учитывают (см. например, [4, 5]) влияние скорости на перепад давления принимая, что последний постоянен и равен весу жидкости столба твердых частиц с единичной площадью. В рассматриваемом случае (29) принимает вид:

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) = (\rho_s - \rho) sg.$$

Уравнение (29) можно использовать для определения средней мутности потока при помощи соединенных к трубе пьезометров. Действительно, введя обозначение

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\Delta p}{l}$$

и имея в виду, что

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{p_1 - p_2}{l} = \frac{\gamma (l + \Delta H)}{l} = \gamma \left(1 + \frac{\Delta H}{l} \right),$$

получим,

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\gamma \left(1 + \frac{\Delta H}{l} \right).$$

Подставляя это выражение в (29) находим:

$$\frac{\Delta H}{l} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} s + \frac{8\mu v^\Phi}{\gamma a^2} \quad (30)$$

Имея разность уровней в пьезометрах ΔH (рис. 3) и расстояние между точками их соединения к трубе l , по этой формуле можно определить мутность в сечении между этими пьезометрами.

В частном случае, когда двухкомпонентная смесь состоит из воды и воздуха, удельным весом воздуха (γ_s) по сравнению с удельным весом воды можно пренебречь, тогда (30) примет вид:

$$\frac{\Delta H}{l} = -s + \frac{8\mu V^\Phi}{\gamma a^2} \quad (31)$$

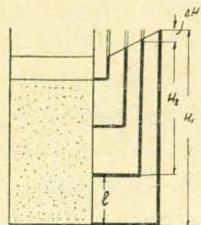


Рис. 3.

Опыты, поставленные в лаборатории ИВП по измерению мутности ультразвуковым методом подтвердили формулу (30). Некоторое отклонение порядка 20% объяснялось неравномерностью диаметров твердых частиц.

Определим силу сопротивления твердых частиц движению жидкости. Согласно первым двум уравнениям системы (17)

$$R_x = -(1-s) \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$R_y = -(1-s) \frac{\partial p}{\partial y}.$$

Но так как по (18) и (19) $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$ получается

$$R_x = R_y = 0,$$

т. е. в поперечном направлении частицы сопротивления не испытывают.

Продольную составляющую R_z определим из последнего уравнения (15). Имеем

$$R_z = s \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_s s g.$$

Согласно (27)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -(\rho_s - \rho) g - \rho g - \frac{8\mu v^\Phi}{a^2}.$$

Следовательно

$$R_z = s(1-s) \left[(\rho_s - \rho) g - \frac{8\mu(1-s)v_{cp}}{a^2} \right] \quad (32)$$

или

$$R_z = s(1-s) \left[(\rho_s - \rho) g - \frac{8\mu v^\Phi}{a^2} \right] \quad (32')$$

Из (32) или (32') видно, что когда $s=0$ (чистая жидкость) и $s=1$ (твердые частицы) $R_z=0$. Как видно из приведенных выражений они не учитывают влияния диаметра частиц.

Վ. Գ. ՍԱՆՈՅԱՆ

ՌԵԶՈՆԱՆՏԻ ՎԵՐԱԿԱՆՈՒՄՈՒՄ ՄԱՆՐ ԿԱՆԱԿԱԾ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ՇԱՐՔԻՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. Վ.

Հոգվածում արվում է հրկրադարիչ հեղուկների շարժման (1)–(4) դիֆերենցիալ հավասարումները: Նման հավասարումներ առաջին անգամ արվել են Ֆ. Ի. Ֆրանկլի |1, 2| կողմից, ընդունելով, որ լարվածութունների թեկնդորը նույնն է թե կոշտ և թե հեղուկ մասնիկների ներսում: Մեղ մոտ ընդունվում է, որ լարվածութունները կոշտ մասնիկներում բացակայում են (որովհետև նրանց դեֆորմացիան չնչին է), իսկ հեղուկ մասնիկներում այն ենթարկվում (10) ընդհանրացած օրենքին, որի համաձայն լարվածութունների թեկնդորը գծաչորեն է կախված արագութունների դեֆորմացիայի թեկնդորից: Օգտագործելով հավասարումները, լուծված է խնդիր, որի զեպքում մասնիկները գտնվում են կախված վիճակում ուղղաձիգ խողովակի մեջ: Այդ զեպքում ստացվում է, որ ջրի մասնիկների արագութունները բավարարում են (22) հավասարմանը, իսկ ճնշման անկումն արտահայտվում է (29) առնչությամբ: Վերջինս կարելի է օգտագործել նաև խողովակում հեղուկի պոտրությունը որոշելու համար (30):

Հոգվածի վերջում արվում է (32) և (32') արտահայտությունները, որոնց միջոցով կարելի է որոշել հեղուկ և կոշտ մասնիկների միասին ծավալին համապատասխանող փոխադրեցություն ուժերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Франкль Ф. И. К теории движения взвешенных наносов. ДАН СССР, т. 92, № 2, 1953.
2. Франкль Ф. И. Уравнения энергии для движения жидкостей со взвешенными наносами. ДАН СССР, т. 102, № 5, 1955.
3. Tesarik J. Fluidization des particules granuleuses et des flocons dans l'eau—La Houille Blanche, № 6, Novembre, 1959.
4. Минц Д. М. О взвешивании зернистого слоя в восходящем потоке жидкости. ДАН СССР, т. 82, № 1, 1952.
5. Минц Д. М. О гидродинамическом сопротивлении взвешенного в потоке зернистого слоя. ДАН СССР, т. 83, № 4, 1952.

ГИДРАВЛИКА

Э. Т. ДЖРБАШЯН

ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Изучение движения тяжелых частиц в турбулентном потоке является существенным при рассмотрении транспортирующей способности наносонесущего потока, ибо суммарное взаимодействие между твердыми частицами и жидкостью в основном обуславливается относительной скоростью между ними. При построении теории движения наносонесущих потоков, различные авторы по-разному подходят к решению этой сложной проблемы. Одни из них принимают продольные составляющие скорости частиц и потока одинаковыми, а вертикальные составляющие скорости отличающимся лишь на величину гидравлической крупности твердых частиц (М. А. Великанов, Г. И. Баренблатт). Тем самым силы сопротивления и работу взвешивания они относят только к части гидравлической крупности частиц в вертикальном направлении. Другие авторы (Ф. И. Франкль, В. Г. Саноян, А. К. Ананян и Г. С. Телетов), рассматривают наносонесущий поток как движение двух непрерывных сред.

Ряд исследователей изучает движение твердых частиц в турбулентном потоке, как движение дискретных тел. И поскольку в вопросах группового движения твердых частиц, даже в неподвижной среде, пока не все исследовано, то в некоторых случаях задача об относительной скорости твердых частиц и жидкости в качестве первого приближения упрощается и сводится к рассмотрению движения одиночной частицы в турбулентном потоке [1—6].

В работе [1], по-видимому впервые получены выражения относительных скоростей твердых частиц и жидкости для мелких наносов, с радиусом $r=10^{-4} \div 10^{-2}$ см при линейном и нелинейном законах сопротивления. Процесс описанный в работе [1] скорее граничит с диффузией. Для случая нелинейного закона сопротивления в работе [1] применен анализ размерностей. Рассматривался также случай с синусоидальным законом изменения относительной скорости. В работе [2] выведены общие уравнения движения тяжелой частицы в турбулентном потоке при линейном и квадратичном законах сопротивле-

ния. Методом операционного исчисления дается решение этих уравнений, заранее принимая для турбулентных пульсаций их периодичность.

В частности, векторное уравнение движения тяжелой частицы для квадратичного закона сопротивления имеет вид:

$$(\rho_s D + \mu) \frac{dW_r}{dt} + C W_r \cdot w_r = -(\rho_s - \rho) D \frac{dW}{dt} + (\rho_s - \rho) D g, \quad (1)$$

где $W(u, v)$ — вектор скорости потока, $W_s(u_s, v_s)$ — вектор абсолютной скорости движения частицы, $W_r(u_r, v_r)$ — вектор относительной скорости движения частицы и жидкости, ρ и ρ_s — плотности жидкости и частицы соответственно, D — объем частицы, g — вектор ускорения силы тяжести, μ — коэффициент присоединенных масс, C — коэффициент сопротивления.

В работах [3 и 4] приводятся аналогичные уравнения для линейного и квадратичного законов сопротивления и дается их решение с применением статистических методов исследования непрерывных полей. В указанных работах уравнения выведены для движения водяной капли в атмосфере, и потому в работе [4] пренебрежена ρ по сравнению с ρ_s , так как $\rho_s \gg \rho$. При рассмотрении же движения наносов в воде, где $\rho_s/\rho = 1, 3 \div 2, 7$ этого делать нельзя.

Рассмотрим плоскую задачу, направляя координатные оси X — в направлении движения и Y — в перпендикулярном направлении ко дну потока. Проектируем все силы, действующие на частицу, по направлению движения (ось X), тогда уравнение (1) примет вид:

$$(\rho_s D + \mu) \frac{dU}{dt} + C U^2 = -(\rho_s - \rho) D \frac{dU}{dt} + (\rho_s - \rho) D g \sin \alpha. \quad (2)$$

В работе сделана попытка решить уравнение (2) и эти результаты сравнить с данными эксперимента.

Введя обозначения $C = \frac{(\rho_s - \rho) D g}{W_{cr}^2}$, $a = \frac{(\rho_s - \rho) D g}{W_{cr}^2 (\rho_s D + \mu)}$,

$$K = \frac{\rho D + \mu}{\rho_s D + \mu}, \quad l = \frac{(\rho_s - \rho) D g \sin \alpha}{\rho_s D + \mu}.$$

$U_r = U_s - U$ и подставляя в уравнение (2) получим дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dU_s}{dt} + a (U_s - U)^2 = K \frac{dU}{dt} + l. \quad (3)$$

Учитывая, что в обычных русловых потоках, согласно экспериментам М. А. Великанова, Е. М. Минского и автора пульсационная составляющая скорости $U'(t)$ составляет приблизительно 10–25% от осредненной скорости, для мгновенных скоростей принимаем выражение:

$$U(t) = \bar{U} + \varepsilon U_1(t), \quad (4)$$

где $\varepsilon U_1(t) = U'(t)$ а $U_1(t)$ имеет порядок $\bar{U}$. Тогда для ε получим, что $0 < \varepsilon < 1$. Решение уравнения (3) отыскивается при помощи рядов расположенных по степеням ε

$$U_s(t) = U_{s0}(t) + \varepsilon U_{s1}(t) + \varepsilon^2 U_{s2}(t) + \dots \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) и (5) в уравнение (3) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях ε , получим бесконечную систему дифференциальных уравнений.

Остановимся на первых трех уравнениях этой системы.

Решение первого уравнения этой системы экспоненциально затухающее и при $t \gg T$, при $\frac{1}{T} = 2\sqrt{a\Gamma}$, будет иметь вид:

$$U_{s0} - \bar{U} = \sqrt{\frac{\bar{U}}{a}} = W_{\text{ст}} \sqrt{\sin \alpha}, \quad (6)$$

где $W_{\text{ст}}$ — групповая скорость падения твердых частиц в жидкости.

Нулевое приближение в решении (3) дает продольную составляющую скорости падения частицы в ламинарном потоке движущемся со скоростью $\bar{U}$. Оно по существу не отличается от решения Панчева [3].

Решение второго уравнения с учетом (6) будет иметь вид:

$$U_{s1} = K U_1(t) + \frac{1-K}{T} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau}{T}} U_1(t-\tau) d\tau. \quad (7)$$

Это решение отличается от решения Панчева [4] членом $KU_1(t)$.

Решение третьего уравнения системы с учетом (7) будет иметь

$$\text{вид: } U_{s2} = -(K-1)^2 \cdot a \left\{ \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau_1}{T}} \cdot [U_1(t-\tau_1)]^2 \cdot d\tau_1 - \right.$$

$$- \frac{2}{T} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau+\tau_1}{T}} U_1(t-\tau_1) \cdot U_1(t-\tau-\tau_1) d\tau \cdot d\tau_1 +$$

$$\left. + \frac{1}{T^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau+\tau_1+\tau_2}{T}} U_1(t-\tau-\tau_1) U_1(t-\tau-\tau_2) d\tau \cdot d\tau_1 \cdot d\tau_2 \right\}. \quad (8)$$

Это существенно отличается от решения Панчева.

После подстановки полученных выражений (6), (7) и (8) в (5), имея в виду, что $\varepsilon U_1(t) = U'(t)$ и осредняя полученное выражение по времени, будем иметь:

$$\bar{U}_s - \bar{U} = \sqrt{\frac{\bar{U}}{a}} - (K-1)^2 \cdot a \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau}{T}} [\overline{U'(t-\tau)}]^2 +$$

$$+ \frac{2(K-1)^2 a}{T^2} \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{\tau+\tau_1}{T}} \overline{U'(t-\tau_1) U'(t-\tau_1-\tau)} d\tau \cdot d\tau_1.$$

$$- \frac{(K-1)^2 a}{T^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{\tau+\tau_1+\tau_2}{T}} \overline{U'(t-\tau_1) U'(t-\tau-\tau_2)} \cdot d\tau \cdot d\tau_1 \cdot d\tau_2. \quad (9)$$

Дальнейший анализ и преобразование полученного результата ведется при помощи статистических методов исследования непрерывных полей, нашедших за последние годы широкое применение в теоретических исследованиях турбулентности благодаря работам А. Н. Колмогорова, А. М. Обухова, А. М. Яглома и др.

Следуя А. Н. Колмогорову введем временную структурную функцию:

$$D(\tau) = \overline{[U(t) - U(t-\tau)]^2},$$

где τ — время, за которое определяется структурная функция.

Подинтегральное выражение четвертого члена правой части равенства (9) может быть представлено через структурную функцию в виде:

$$\overline{U'(t-\tau-\tau_1) U'(t-\tau-\tau_2)} = \frac{1}{2} D(\tau_1-\tau_2) + \overline{[U'(t-\tau)]^2};$$

третий член в правой части (9) в виде:

$$\overline{U'(t-\tau_1) U'(t-\tau_1-\tau)} = \frac{1}{2} D(\tau) + \overline{[U'(t-\tau)]^2}.$$

Подставляя это выражение в (9), получим:

$$\begin{aligned} \overline{U_s - U} = & \sqrt{\frac{l}{a}} - (K-1)^2 \int_0^\infty e^{-\frac{\tau}{T}} \cdot D(\tau) d\tau + \\ & + \frac{(K-1)^2 a}{2 T} \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{\tau_1+\tau_2}{T}} D(\tau_1-\tau_2) d\tau_1 \cdot d\tau_2 \dots \end{aligned} \quad (10)$$

Пользуясь преобразованием, приведенным в работе [6] получим

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{\tau_1+\tau_2}{T}} D(\tau_1-\tau_2) d\tau_1 \cdot d\tau_2 = & T \int_0^\infty e^{-\frac{\tau''}{T}} D(\tau'') d\tau''; \\ \overline{U_s - U} = & \sqrt{\frac{l}{a}} - \frac{(K-1)^2 a}{2} \int_0^\infty e^{-\frac{\tau}{T}} D(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) при $\frac{1}{T} = 2 \sqrt{al}$ примет вид

$$\overline{U_s} - \overline{U} = \sqrt{\frac{l}{a}} \left[1 - \frac{(K-1)^2 a}{l} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau}{T}} D(\tau) d\tau \right]. \quad (12)$$

Автором статьи сделана попытка определить аналитический вид функции $D(\tau)$ на основе экспериментальных данных.

Обрабатывались хронограммы продольных пульсационных скоростей, полученных при помощи установки „следящая щель“ [7] для двух точек потока глубиной $H = 6,0$ см.

Значения $\Delta U'(t) = U'(t) - U'(t - \tau)$ определялись графически для десяти различных значений τ на глубине $H_1 = 2,0$ см и восьми значений τ на глубине $H_2 = 4,4$ см. Величина τ при этом колебалась в пределах от 0,08 до 21,7 сек.

При построении структурной функции вместо значений $[\Delta U'(t)]^2$ пользовались значениями $|\Delta U'(t)|$,² вычисление которых, во-первых, проще вычисления значений τ , и, во-вторых, отдельные большие значения $\Delta U'(t)$ сильно отличающиеся от остальных, заметно сглаживаются.

Известно, что значение структурной функции отличается от $[\Delta U'(t)]^2$ постоянным множителем и при нормальном распределении вероятности она определяется теоретически и равна $\pi/2$.

С целью дополнительной проверки значений K , были построены экспериментальные и теоретические кривые распределения вероятностей $\Delta U'$ для различных значений τ , и определены необходимые условия существования нормального закона распределения $\Delta U'$. Результаты обработки этих кривых приведены в табл. 1, где β_1 и β_2 —

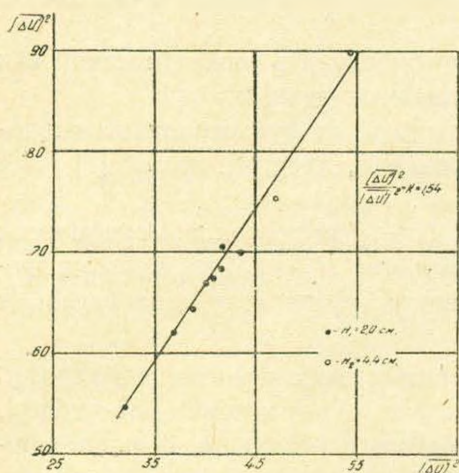
Таблица 1

Высота точки	№№	τ сек	$ \Delta U' $	σ	β_1	β_2	$\frac{\chi^2 - a_{\chi^2}}{\sigma_{\chi^2}} < 3$	$D_{\max}$	λ	$P(\lambda) \wedge 0,05^*$
$H = 2,0$ см	1	0,08	5,66	7,38	0,096	-0,02	-0,73	—	—	—
	2	0,28	6,07	7,9	0,101	-0,45	0,32	—	—	—
	3	0,7	6,23	8,01	0,131	-0,6	-0,8	—	—	—
	4	1,4	6,32	8,17	-0,049	-0,22	-0,71	—	—	—
	5	2,0	6,47	8,24	-0,266	-0,52	2,3	—	—	—
	6	3,18	6,45	8,39	-0,120	-0,23	1,61	—	—	—
	7	4,44	6,39	8,21	0,047	-0,38	1,44	15,5	0,694	0,71
	8	5,86	6,61	8,36	-0,024	-0,34	-0,44	—	—	—
	9	11,45	6,53	7,96	-0,270	-0,62	1,36	—	—	—
	10	21,74	6,60	8,18	-0,270	-0,52	2,07	—	—	—

коэффициенты асимметрии и эксцесса; χ^2 — критерии К. Пирсона; D — максимальная разница эмпирической и теоретической кривых распределения в критерии согласия А. Н. Колмогорова.

* Значение $P(\lambda)$ соответствует максимальному значению D для всех возможных величин τ .

На рис. 1 представлена экспериментальная кривая $[\Delta U'(t)]^2 = f_2([\Delta U'(t)]^2)$ коэффициент наклона прямой $K=1,54$, что соответствует



значению $\approx \frac{\pi}{2} = 1,57$.

Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются степенной функцией вида:

$$D(\tau) = A \tau^\beta \quad (13)$$

К аналогичному выводу пришли в своих работах А. Н. Колмогоров и А. М. Обухов.

На рис. 2 представлены кривые $\frac{[\Delta U']}{U} = f(\tau)$.

По выражению (13) на рис. 3 в логарифмических координатах определены значения:

$$\sqrt{A_1} = 0,0596 \quad \beta_1 = 0,06 \text{ для глубины } H_1 = 2,0 \text{ см};$$

$$\sqrt{A_2} = 0,06 \quad \beta_2 = 0,10 \text{ для глубины } H_2 = 4,4 \text{ см}.$$

После подстановки (13) в выражение (12) и преобразований получим:

$$\bar{U}_s - \bar{U} = \sqrt{\frac{l}{a}} \left[1 - \frac{(K-1)^2 \cdot a \cdot A T^2}{4l} \int_0^\infty e^{-\frac{\tau}{T}} \left(\frac{\tau}{T} \right)^\beta \cdot d \left(\frac{\tau}{T} \right) \right]. \quad (14)$$

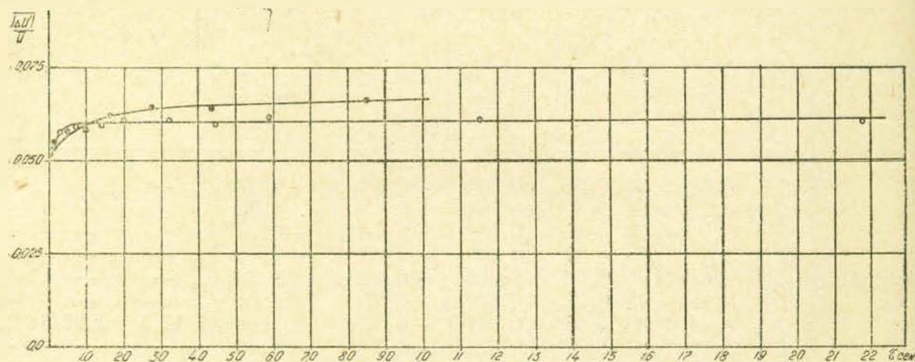


Рис. 2. Кривые зависимости $\frac{[\Delta U']}{U} = f(\tau)$

где интеграл из себя представляет γ — функцию и равен $\Gamma(1+\beta)$. По этому получим окончательно

$$\bar{U}_s - \bar{U} = \sqrt{\frac{l}{a}} \left[1 - \frac{(K-1)^2 \cdot a \cdot A T^2}{4l} \cdot \Gamma(\beta+1) \right]. \quad (15)$$

По кривой $\Gamma(1+\beta) = f_1(\beta)$ на рис. 4 определены значения $\Gamma(1+\beta)$ для полученных двух значений β и по формуле (15) произведен расчет для следующих параметров потока и наносов. Резуль-

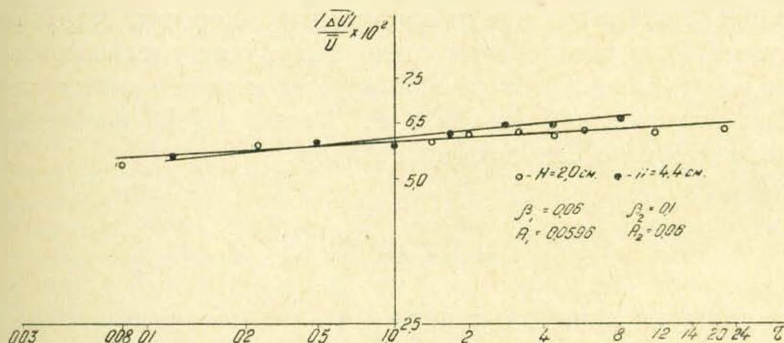


Рис. 3. Логарифмическая кривая для определения значения β и A .

таты этого расчета сопоставлены с экспериментальными данными автора. (рис. 5). При расчетах приняты $H=6,0$ см; уклон потока к горизонту $i=0,005$; объемный вес наносов $\gamma=1,4$ т/м³; диаметр наносов $d_{cp}=0,85$ мм; гидравлическая крупность наносов $W_0=3,85$ см/сек. По формулам и кривым работы [8] произведен переход от скорости падения одиночной частицы к их групповой скорости падения. Однако большой разницы между ними

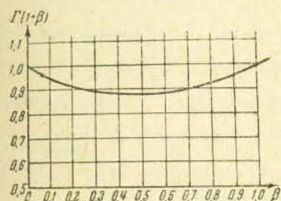


Рис. 4. Зависимость $\Gamma(1+\beta) = f_1(\beta)$

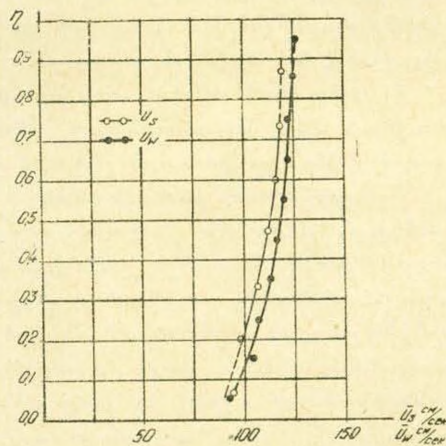


Рис. 5. Экспериментальные кривые $U = f_3(\gamma)$ для твердых частиц и взвешенной жидкости.

при этом не наблюдается, так как средняя мутность потока весьма мала. Скорость стесненного падения частиц получилась равной 3,79 см/сек. Относительные скорости твердых частиц и жидкости, рассчитанные по формуле (15), получились равными: $\bar{U}_s - \bar{U} = -2,0$ см/сек при $H_1=2,0$ см; $\bar{U}_s - \bar{U} = -3,2$ см/сек, при $H_2=4,4$ см. Те же скорости, определенные по экспериментальной кривой, приведенной на рис. 5 составляют соответственно $-5,0$ см/сек и $-4,0$ см/сек.

Необходимо отметить, что качественная сторона полученных результатов по расчету и по эксперименту хорошо совпадает, т. е. в обоих случаях жидкость опережает твердые частицы.

Расчеты по определению относительных скоростей проведены также для одной и той-же точки расположенной на глубине $H=2,0$ см. от дна, при трех средних мутностях потока.

Интересно отметить, что относительные скорости, определенные по формуле (15), с увеличением средней мутности уменьшаются. Этот результат в определенной мере согласуется с результатами экспериментальных исследований автора и J. Tesarik-a [9], проведенных в вертикальной трубе с восходящим потоком.

Է. Տ. ԶՐԲԱՇԻԱՆ

ՏՈՐՐՈՒԼՆԵՏ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ԿՈՇՏ ՄՈՍՆԻԿՆԵՐԻ ՀԱՐԱՐԵՐԱԿԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Տորրուլենտ հոսանքներում ծանր մասնիկների շարժման հարցը հիդրոտրանսպորտի ուսումնասիրման ժամանակ էական հարցերից մեկն է, քանի որ ծանր մասնիկների և կրող ջրի փոխազդեցությունը հիմնականում պայմանավորված է նրանց միջև գոյություն ունեցող հարաբերական արագությամբ:

Տարբեր հեղինակներ տարբեր ձևով են լուսաբանում այդ հարցը գրականության մեջ: Չկարողանալով ճիշտ որոշել այդ արագությունը, նրանք կատարում են այս կամ այն ընդունելություններ:

Աշխատանքում հետազոտված է ծանր մասնիկի շարժումը տորրուլենտ հոսանքում, վերջինիս ցուցաբերած դիմադրության քառակուսային օրենքի ստեղծմամբ: Մասնիկի շարժման դիֆերենցիալ հավասարումը կախված միայն ժամանակից լուծվում է փոքր պարամետրի մեթոդով: Ստացված են մասնիկի շարժման արագության երեք մոտավորությունները, որոնք համապատասխանում են ε փոքր պարամետրի զերո, առաջին և երկրորդ աստիճաններին: Այս և լրիվ լուծումը մինչև երկրորդ աստիճանի ε -ի համար, հետազոտվում կիրառելով ստրուկտուրային ֆունկցիաների գաղափարը պատահական անընդատ դաշտերի ուսումնասիրման վիճակագրական տեսությունից այն բերվում է (12) հավասարմանը, որը և հնարավորություն է տալիս $D(\varepsilon)$ ֆունկցիայի անկախության պայմաններում, որոշել ծանր մասնիկի և կրող հեղուկի հարաբերական արագությունը:

Աշխատանքում փորձ է արված էքսպերիմենտալ ճանապարհով որոշել $D(\varepsilon)$ ֆունկցիայի տեսքը և վերջինիս օգնությամբ հաշվել հարաբերական արագությունները ծանր մասնիկի և կրող հեղուկի համար: Հասկանալի է, որ $D(\varepsilon)$ փորձնական որոշման ժամանակ հաշվի են առնված սահմանային պայմանները: Այսպիսով (15) բանաձևը հնարավորություն է տալիս առաջին մոտավորությամբ որոշել ծանր մասնիկի և տարող հեղուկի շարժման հարաբերական արագությունը: (15) բանաձևով ստացված արդյունքները համեմատված են հեղինակի փորձերի հետ (յժ, 5):

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Tchen-Chon-mon*. Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid. Hague, 1947.
2. *Хаскинд М. Д.* К теории наносов. О движении тяжелой частицы в турбулентном потоке. Известия АН СССР (ОТН), № 11, 1956.
3. *Панчев Ст.* Движение тяжелых частиц в турбулентном потоке при линейном законе сопротивления. Доклады Болгарской АН, т. 12, № 3, 1959.
4. *Панчев Ст.* Движение тяжелых частиц в конвекционном турбулентном потоке при квадратичном законе сопротивления. Доклады Болгарской АН т. 12, № 4, 1959.
5. *Дементьев А. М.* Опыт теории расчета гидротранспорта. Изв. ВНИИГ т. 36, 1948.
6. *Яглом А. М.* Об учете инерции метеорологических приборов при измерениях в турбулентной атмосфере. Тр. Геофизического института, № 24, 1954.
7. *Джрбабян Э. Т. и Карапетян Р. М.* Установка „Следящая щель“ для измерения турбулентных характеристик потока. Вторая Закавказская конференция молодых научных работников, Тбилиси, 1962.
8. *Минц Д. М. и Шуберт С. А.* Гидравлика зернистых материалов. МКХ РСФСР, М., 1955.
9. *Tesarik J.* The fluidization of granulated particles and flocs in water, La Houille Blanche № 6, 1959.

ГИДРАВЛИКА

И. Г. КРИСТОСТУРЯН

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА СВОБОДНОЙ
 ПОВЕРХНОСТИ И ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ
 УЧАСТКЕ КАНАЛА ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ТЕЧЕНИИ

Исследование неустановившегося движения в открытых руслах, в частности добегания волны пускa в каналах с расширяющимся или с сужающимся участком, приводит к решению системы двух дифференциальных уравнений, первое из которых характеризует неустановившееся плавно-изменяющееся движение, а второе — уравнение неразрывности. Свободная поверхность при установившемся неравномерном движении, т. е. $\eta = h(x, y)$ является начальным условием при решении задачи неустановившегося движения. Вид этой функции обычно определяется экспериментально. Изменение глубины с течением времени в начальном створе $h = h(t)$ будет граничным условием.

В статье делается попытка определить вид функции $\eta = h(x, y)$ аналитически.

Постановка задачи

Определение вида свободной поверхности при установившемся движении теоретическим путем, приводит к решению следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} 1. \quad & U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = ig - \frac{1}{\rho} + \nu \Delta U - 2k \frac{\partial}{\partial x} \left(U \frac{F}{B} \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{F}{B} U \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{F}{B} U \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right]; \\ 2. \quad & U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \Delta V - \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{F}{B} U \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] - \\ & - 2k \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{F}{B} U \frac{\partial V}{\partial y} \right] - \frac{\partial y}{\partial z} \left[k \frac{F}{B} U \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right]; \\ 3. \quad & U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta W - \frac{\partial}{\partial x} \left[k U \frac{F}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[k U \frac{F}{B} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] - 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[k U \frac{F}{B} \frac{\partial W}{\partial z} \right]; \end{aligned}$$

$$4. \quad \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0.$$

При выводе этой системы использовано предположение

$$\overline{U_i U_j} = k \frac{F}{B} U \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right),$$

где $\overline{U_i U_j}$ — пульсационные напряжения:

$k \frac{F}{B} \equiv A$ — коэффициент, который по известной гипотезе Буссинеска

берется пропорциональным скорости U ; $k = \frac{g}{MG}$ коэффициент Буссинеска имеющий размерность C ; C — коэффициент Шези.

Задача решается для каналов трапециодального поперечного сечения при следующих граничных условиях:

$$1. \quad P = 0, \text{ при } z = \eta(x, y),$$

где $\eta = \eta(x, y)$ искомая свободная поверхность;

$$2. \quad U = V = W = 0 \text{ на стенках канала, при } z = m(y - b/2),$$

где m — коэффициент откосов канала,

$b = b_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha$ — ширина канала по дну;

$$3. \quad U = V = W = 0 \text{ на дне, при } z = 0;$$

$$4. \quad W = U \frac{\partial \eta}{\partial x} + V \frac{\partial \eta}{\partial y} \text{ при } z = \eta(x, y),$$

где U, V, W продольная, поперечно-горизонтальная, и поперечно-но-вертикальная составляющие скорости.

5. $\eta(x, y) = h_0 = \text{const}$ при $x = 0$, где $x = 0$ сечение, где начинается расширяющаяся часть канала; h_0 — глубина потока в этом сечении, величина которой может быть определена с помощью формул неравномерного движения (расчет кривой спада).

Метод решения

Задача решается методом малого параметра. Малым параметром является тангенс половины угла расширения канала

$$\operatorname{tg} \alpha = \sigma.$$

Исходя из конкретных данных модели положено, что H/b и b/L имеют порядок σ . С учетом принятых обозначений и оценки всех членов входящих в уравнения, рассмотренная система дифференциальных уравнений приводится к виду

$$1. \quad \sigma^2 \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{i}{F_r} - \frac{\sigma^2}{F_r} \frac{\partial P}{\partial x} - \sigma^2 k \frac{\partial}{\partial y} \left[U \frac{F}{B} \frac{\partial U}{\partial y} \right] - \\ - k \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{F}{B} U \frac{\partial U}{\partial z} \right];$$

$$\begin{aligned}
 2. \quad & \sigma^2 \left(U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = - \frac{1}{F_r} \frac{\partial P}{\partial y} - \sigma^2 \kappa \frac{\partial}{\partial x} \left[U \frac{F}{B} \frac{\partial U}{\partial y} \right] - \\
 & - k \sigma^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[U \frac{F}{B} \frac{\partial V}{\partial y} \right] - k \frac{\partial}{\partial z} \left[U \frac{F}{B} \frac{\partial V}{\partial t} \right] - k \sigma^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{F}{B} U \frac{\partial W}{\partial y} \right]; \\
 3. \quad & 0 = - \frac{1}{F_r} - \frac{1}{F_r} \frac{\partial P}{\partial z} - k \sigma^2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{F}{B} U \frac{\partial U}{\partial z} \right] - k \sigma^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{F}{B} U \frac{\partial V}{\partial z} \right] - \\
 & - 2 \sigma^2 k \frac{\partial}{\partial z} \left[U \frac{F}{B} \frac{\partial W}{\partial z} \right]; \\
 4. \quad & \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0.
 \end{aligned}$$

В приведенных уравнениях:

$F_r = \frac{U_{cp}^2}{gH}$ (U_{cp} — средняя скорость до расширения канала); члены имеющие порядок выше σ^2 отброшены.

Решение системы уравнений ищется в виде рядов по степеням малого параметра σ .

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 + \sigma P_1 + \sigma^2 P_2 + \dots; \\
 U &= U_0 + \sigma U_1 + \dots; \\
 V &= V_0 + \sigma V_1 + \dots; \\
 W &= W_0 + \sigma W_1 + \dots; \\
 \eta &= \eta_0 + \sigma \eta_1 + \dots
 \end{aligned}$$

Подставляя значения P , U , V , W и η в систему полученных уравнений, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях σ в правых и левых частях каждого уравнения, получим систему дифференциальных уравнений, позволяющую определить значения U_0 , V_0 , W_0 , P_0 , U_1 , V_1 , W_1 и т. д.

Так, например, для нулевого приближения получится следующая система:

$$\begin{aligned}
 1. \quad & \frac{i}{F_r} = k \left(\frac{F}{B} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left[U_0 \frac{\partial U_0}{\partial z} \right]; \\
 2. \quad & \frac{1}{F_r} \frac{\partial P_0}{\partial y} = - k \left(\frac{F}{B} \right)_0 \frac{\partial}{\partial z} \left[U_0 \frac{\partial V_0}{\partial z} \right]; \\
 3. \quad & 0 = - \frac{1}{F_r} - \frac{1}{F_r} \frac{\partial P_0}{\partial z}; \\
 4. \quad & \frac{\partial U_0}{\partial x} + \frac{\partial V_0}{\partial y} + \frac{\partial W_0}{\partial z} = 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Согласно граничному условию (1) $P = 0$ при $z = \eta(x, y)$ или $P_0 + \sigma P_1 + \dots = 0$ при $z = \eta_0 + \sigma \eta_1 + \dots$

Разлагая P в ряд Тейлора вблизи η_0

$$P = P(\eta_0) + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{z=\eta_0} (z - \eta_0) + \dots$$

и учитывая, что на свободной поверхности

$$z - \eta_0 = \sigma\eta_{11} + \sigma^2\eta_{12} + \dots$$

получим

$$P = P(\eta_0) + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{z=\eta_0} (\sigma\eta_{11} + \dots) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)_{z=\eta_0} (\sigma\eta_{11} + \dots)^2 + \dots$$

или

$$P(\eta_0) + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{z=\eta_0} (\sigma\eta_{11} + \dots) + \dots + \sigma \left\{ P_1(\eta_0) + \left(\frac{\partial P_1}{\partial z}\right)_{z=\eta_0} (\sigma\eta_{11} + \dots) + \dots \right\} + \dots = 0.$$

Приравнявая нулю сумму коэффициентов при нулевой степени получим первое граничное условие в нулевом приближении

$$P_0 = 0 \text{ при } z = \eta_0.$$

В первом приближении будем иметь:

$$P_1 + \frac{\partial P_0}{\partial z} \eta_{11} = 0 \text{ при } z = \eta_0.$$

Аналогично граничное условие (4), в нулевом приближении, имеет вид:

$$W_0 = \frac{\partial \eta_0}{\partial x} U_0 + \frac{\partial \eta_0}{\partial y} V_0 \text{ и т. д.}$$

Таким образом, соответствующие нулевому приближению граничные условия выразятся так:

1. $P_0 = 0$ при $z = \eta_0$;
2. $U_0 = V_0 = W_0 = 0$ при $z = m(y - b/2)$,
3. $U_0 = V_0 = W_0$ при $z = 0$;
4. $W_0 = U_0 \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + V_0 \frac{\partial \eta_0}{\partial y}$ при $z = \eta_0$;
5. $\eta_0 = h_y$ при $x = 0$.

Без особого ущерба для точности решения можно положить, что $\sigma\eta_{11} = \sigma^2\eta_{12} = \dots = 0$ при $x = 0$.

Решение задачи

Решением системы (1) будут выражения для трех составляющих скоростей и давления в нулевом приближении

$$U_0 = \sqrt{\frac{i}{kF_r \left(\frac{F}{B}\right)_0} [z^2 - m z (y - b/2)]};$$

$$V_0 = - \frac{\partial (\eta_0 - z)}{\partial y} \frac{U_0}{i};$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{i}{kF_r \left(\frac{F}{B}\right)_0} \left\{ \left[\frac{1}{2 \left(\frac{F}{B}\right)_0} \frac{\partial \left(\frac{F}{B}\right)_0}{\partial x} - \frac{\partial^2 (\eta_0 - z)}{\partial y^2} - \frac{1}{2 \left(\frac{F}{B}\right)_0} \frac{\partial \left(\frac{F}{B}\right)_0}{\partial y} \cdot \frac{\partial (\eta_0 - z)}{\partial y} \right] \cdot \frac{2z - m (y - b/2)}{4} + \frac{m}{2} \frac{\partial (\eta_0 - z)}{\partial y} - \frac{m \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} \right\}} \cdot \sqrt{z^2 - m (y - b/2)},$$

$$P_0 = \eta_0 - z.$$

Граничные условия 4 и 5, которые не были использованы при определении значения скоростей и давления, используются для определения неизвестной η_0 . Действительно, подставив в граничное условие 4 найденные значения U_0 , V_0 , W_0 , получим дифференциальное уравнение относительно η_0 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (F/B)}{\partial x} \sqrt{\frac{i}{kF_r \left(\frac{F}{B}\right)_0} \frac{1}{2 \left(\frac{F}{B}\right)_0} \frac{2 \eta_0 - m \operatorname{tg} \alpha (y - b/2)}{4}} = \\ = \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \sqrt{\frac{i}{kF_r \left(\frac{F}{B}\right)_0}} + \frac{m \operatorname{tg}^2 \alpha}{2}. \end{aligned}$$

Отношение $\left(\frac{F}{B}\right)_0$ выразится через η_0 следующим образом:

$$\left(\frac{F}{B}\right)_0 = \frac{\eta_0}{2} \left[\frac{2 + \frac{2 \eta_0}{m (b_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha)}}{1 + \frac{2 \eta_0}{m (b_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha)}} \right].$$

Подставляя это выражение в последнее дифференциальное уравнение получим

$$A(x, y) \frac{\partial \eta_0}{\partial x} = - \frac{q^2 \operatorname{tg} \alpha}{(1 + q)(2 + q) \eta_0} \frac{2 \eta_0 - \operatorname{tg} \alpha (y - b/2) m}{4} + m \operatorname{tg}^2 \alpha,$$

где

$$q = \frac{2 \eta_0}{m (b_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha)} ;$$

$$A(x, y) = \frac{2 + 2q + q^2}{\eta_0 (1 + q) (2 + q)} \frac{2 \eta_0 - m \operatorname{tg} \alpha (y - b/2)}{4} - 2.$$

Это квазилинейное дифференциальное уравнение первого порядка, которое решается методом конечных разностей. Здесь производная по x заменяется отношением конечных разностей следующим образом:

$$\frac{\partial \eta_0}{\partial x} = \frac{\eta_0^{i+1, j} - \eta_0^{i, j}}{l},$$

где l — величина шага по оси x .

Для нахождения значения скоростей U_1, V_1, W_1 и давления P_1 в первом приближении получается следующая система уравнений

$$1. \quad \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{F}{B} \right)_0 \frac{\partial (U_0 U_1)}{\partial z} + \left(\frac{F}{B} \right)_1 \frac{1}{2} \frac{\partial U_0^2}{\partial z} \right] = 0;$$

$$2. \quad 0 = -\frac{1}{F_2} \frac{\partial P_1}{\partial y} - k \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{F}{B} \right)_1 U_0 \frac{\partial V_0}{\partial z} + \right. \\ \left. + \left(\frac{F}{B} \right)_0 \left[U_0 \frac{\partial V_1}{\partial z} + U_1 \frac{\partial V_0}{\partial z} \right] \right];$$

$$3. \quad 0 = -\frac{1}{F_r} \frac{\partial P_1}{\partial z};$$

$$4. \quad \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} + \frac{\partial W_1}{\partial z} = 0.$$

В этом случае граничные условия описываются следующим образом

$$1. \quad P_1 + \frac{\partial P_0}{\partial z} \eta_1 = 0 \quad \text{при } z = \eta_0;$$

$$2. \quad U_1 = V_1 = 0 \quad \text{при } z = m(y - b/2);$$

$$3. \quad U_1 = V_1 = W_1 = 0 \quad \text{при } z = 0;$$

$$4. \quad \frac{\partial W_0}{\partial z} \eta_1 + W_1 = U_0 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{\partial U_0}{\partial z} \eta_1 \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + V_0 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + \\ + \frac{\partial V_0}{\partial z} \eta_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + U_1 \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + V_1 \frac{\partial \eta_0}{\partial y} \quad \text{при } z = 0;$$

$$5. \quad \eta_1 = 0 \quad \text{при } x = 0.$$

С учетом первых двух приближений выражения для составляющих скоростей U и V после перехода к размерным величинам будут иметь вид:

$$U = \sqrt{\frac{ig}{kh_0} \left\{ 1 - \frac{\eta_1}{h_0} \frac{2 + 2q + q^2}{2(1+q)(2+q)} \right\} \left| \frac{2(1+q)}{2+q} \right|^{1/2} V z^2 - zm(y - b/2)}$$

$$V = \sqrt{\frac{g}{ikh_0} \left\{ \frac{\partial(\eta_0 - z)}{\partial y} \right\} - 1 + \frac{\eta_1(2 + 2q + q^2)}{2h_0(2+q)(1+q)} \left| \frac{\partial\eta_1}{\partial y} \right\} \times$$

$$\times \left| \frac{2(1+q)}{2+q} \right|^{1/2} V z^2 - zm(y - b/2)}$$

Ниже приводится пример расчета прямолинейного канала с расширяющимся участком длиной 1 м. Уклон дна канала $i = 0,002$; $n = 0,010$ м; ширина канала по дну до расширения $b_0 = 0,30$ м; коэффициент откосов канала $m = 1$; расход воды $Q = 12$ л/сек; угол расширения канала $\alpha = 17^\circ$; глубина $h_0 = 0,047$ м.

Результаты расчета глубин с точностью нулевого приближения приведены на графике рис. 1. Там же нанесены экспериментальные

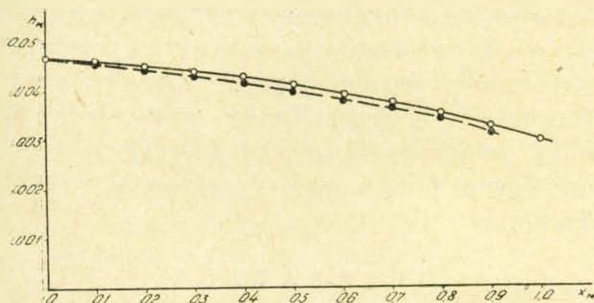


Рис. 1. Вид свободной поверхности на расширяющемся участке канала.

точки. Как видно из графика нулевое приближение уже удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Максимальное отклонение расчетных точек от опытных составляет примерно 4% . В большинстве случаев можно ограничиться нулевым приближением. Однако, для уточнения результатов расчета можно воспользоваться следующим приближением. Кроме глубин вычислены также значения продольной составляющей скорости U в сечениях $x = 0,2$ м и $x = 1,0$ м. Площадь поперечного сечения в створе $x = 1,0$ равна $F = 0,0149$ м²; средняя скорость $u_{ср} = 0,786$ м/сек. Исходя из этих данных получаем $Q = 11,7$ л/сек.

В створе $x = 0,2$ м имеем $u_{ср} = 0,63$ м/сек; $F = 0,018$ м²; $Q = 11,3$ л/сек.

Помимо определения вида свободной поверхности при установившемся движении, полученные формулы дают возможность изучить также изменение скоростей.

Ի. Գ. ՔՐԻՍՏՈՍՏՈՒՐՅԱՆ

ԱՋԱՏ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ԵՎ ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԳԱՇՏԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ,
ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՇԱՐԺՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ, ՋՐԱՏԱՐԻ ԼԱՅՆԱՅՈՂ ՄԱՍՈՒՄ
ԱՆԱԼԻՏԻԿՈՐԵՆ

Ա մ փ ո փ ո տ

Չհաստատված շարժման ուսումնասիրությունը բաց ջրատարներում, մասնավորապես թողքի ալիքի տարածումը ջրատարի լայնացող կամ նեղացող մասերում, բերվում է դիֆերենցիալ հավասարումների մի սխեմի լուծման, որի առաջին հավասարումը բնութագրում է չհաստատված դանդաղ փոփոխվող շարժում, իսկ երկրորդը անխզելիության հավասարումն է:

Ուսումնասիրվում է ուղղաձիգ ջրատար, սեղանաձև կտրվածքով 20 մետր երկարությամբ, ալիք ջրատարը մեջակողում՝ 10 մետրի վրա ճյուղավորվում է: Նախքան ճյուղավորումը, ջրատարն ունի լայնացող մաս 2 մետր երկարությամբ: Այստեղ մակերևույթի տեսքը հաստատված շարժման ժամանակ, այսինքն $h = h(x, y)$, պայման է հանդիսանում սկզբնական չհաստատված շարժման խնդրի լուծման համար: Ալիք կորի տեսքը սովորաբար դրսևում է փորձնական ճանապարհով: Խորություն փոփոխությունը բոլոր ժամանակի սկզբնական կտրվածքում՝ $h = h(t)$ սահմանափակ պայման է հանդիսանում:

Տվյալ աշխատանքում փորձ է արվում ստանալ $h = h(x, y)$ ֆունկցիայի տեսքը տեսականորեն:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Березин И. С. и Жидков Н. П. Методы вычислений, т. II, М., 1950.
2. Рахшмайер Р. Д. Разностные методы решения кривых задач, М., 1960.
3. Стокер Дж. Дж. Волны на воде, 1959.
4. Сухомел Г. И. Вопросы гидравлики открытых русел и сооружений, Киев, 1949.

ГИДРАВЛИКА

Э. Т. ДЖРБАШЯН, Д. М. ОГАНЕСЯН

О КРИВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ КОМПОНЕНТОВ ВЗВЕСНЕСУЩЕГО ПОТОКА

Задачи статистического изучения турбулентности для однородной жидкости впервые были сформулированы в работах А. А. Фридмана и Л. В. Келлера. Они же определили пути решения уравнений движения турбулентного потока при помощи моментных характеристик. Однако уравнения предложенные этими авторами слишком громоздки и незамкнуты, что не дает возможность строго решить поставленную задачу. Дальнейшее развитие статистических исследований турбулентности получили в работах А. Н. Колмогорова, М. Д. Миллионщикова, А. М. Обухова, А. М. Яглома и др., что привело к созданию таких новых направлений, как теория однородной изотропной турбулентности; локальная структура турбулентности и др.

Применение статистических методов исследований к прикладной теории движения наноснесущего потока, в частности к определению транспортирующей способности потока, имеет сравнительно недолгую историю [1—6]. Указанные авторы используют элементы теории вероятности для расчета переноса данных наносов. Так Г. А. Энштейн и С. Х. Абальянц в своих исследованиях исходят из допущения одной вероятности, в большинстве случаев ставя условие перед вертикальной составляющей скорости. Например, в работе [3] принимается допущение, что вероятность отрыва частицы от дна и вероятность нахождения ее на протяжении некоторой длины l во взвешенном состоянии, одинакова. Другие исследователи в основном принимают две вероятности. М. А. Великанов [5] допускает, что для того чтобы лежащая на дне потока твердая частица диаметром D не только поднялась со дна, но и прошла бы некоторый путь во взвешенном состоянии до следующего падения, должна быть под воздействием двух разных сил. При определении этих воздействий он исходит из следующих двух условий:

$$\text{Вер. } (S \geq P) = \eta;$$

$$\text{Вер. } (V \geq W) = \varepsilon,$$

где S — подъемная сила, P — вес частицы, V — вертикальная компонента скорости наноснесущего потока и W — скорость падения частицы в жидкости — гидравлическая крутизна.

Для значений η и ε М. А. Великанов и ряд других исследователей принимают нормальный закон распределения вероятностей в зависимости от скорости придонного слоя и вертикальной составляющей скорости.

В частности, М. А. Великанов принимает следующие выражения:

$$\eta = \int_{\sqrt{\frac{B}{A}} \sqrt{agD}}^{\infty} \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_D - \bar{U}_D)^2}{2\sigma_u^2}} dU;$$

$$\varepsilon = \int_W^{\infty} \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{V^2}{2\sigma_v^2}} dV,$$

где A и B — коэффициент формы частицы, U_D — скорость потока, в придонном слое, σ_u и σ_v — среднеквадратичные отклонения продольной и вертикальной составляющих скорости, ρ_s и ρ — плотности частиц и жидкости, $a = \rho_s/\rho - 1$.

Однако в литературе пока отсутствуют данные распределения кривых вероятностей для компонентов скоростей движения наносонесущей жидкости и самих частиц. Исключение составляют работы Е. М. Минского, С. Ф. Савельева и Иржи Килеша, относящиеся к определению турбулентных характеристик однородной жидкости. В работе С. Ф. Савельева построены кривые распределения вероятностей (и приводится их изменение в зависимости от расположения створов по длине лотка) для вертикальной компоненты пульсации однородной жидкости с применением эмульсионных шариков. Последние имеют удельный вес равный удельному весу несущей жидкости. С. Ф. Савельев связывает значение среднеквадратичных отклонений вертикальной скорости со средними значениями продольной скорости и глубиной потока.

В случае с двухкомпонентными потоками заведомо можно сказать, что скорости твердых частиц, также как и скорости жидкости будут носить случайный характер. Но вопрос изменения кривых распределения этих скоростей в зависимости от глубины и в одной заданной точке в зависимости от различных средних мутностей не нашел достаточного освещения в литературе.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований продольных скоростей твердых частиц и взвешенной жидкости в двухкомпонентном потоке.

Эксперименты проводились в стеклянном лотке длиной 18 м и шириной 0,5 м с одного конца, которого специальным бункером в поток подавались наносы. В качестве наносов был использован белый песок с объемным весом $1,4 \text{ т/м}^3$ и крупностью $d_{cp} = 0,85 \text{ мм}$. В качестве фиксирующего приспособления скоростей твердых частиц и жидкости применялась специальная установка „следящая щель“,

подробное описание которой приводится в работе [7]. При помощи этой установки на обыкновенной 35 мм фотопленке фиксировались траектории частиц песка и эмульсионных шариков (представляющих жидкость), попадающих в вертикальный „световой нож“, шириной 8,0 мм, рассекающий поток на всю его глубину. Фиксация траекторий наносонесущего потока осуществлялась той же установкой, через световой фильтр, который пропускал световые лучи определенной длины, испускаемые белыми шариками эмульсии и поглощал лучи, отражаемые окрашенными частицами песка. При этом строго соблюдалось постоянство гидравлической крупности песчинок. Полученная таким путем картина разбивалась по глубине на зоны определенной высоты. В пределах каждой зоны проводилось осреднение скоростей по объему данной зоны. Осреднение продольных скоростей по времени проводилось по выражению:

$$\overline{U}_{si} = \frac{\sum_{k=1}^n S_{ik}}{\sum_{k=1}^n \Delta t_k}, \text{ где } i = 1, 2, \dots, 8.$$

Здесь S_k — продольная проекция каждой траектории частицы по i -ой зоне; Δt_k — время прохождения каждой частицы по данной траектории; $\overline{U}_{si}$ — осредненная продольная скорость по времени Δt_k . По най-

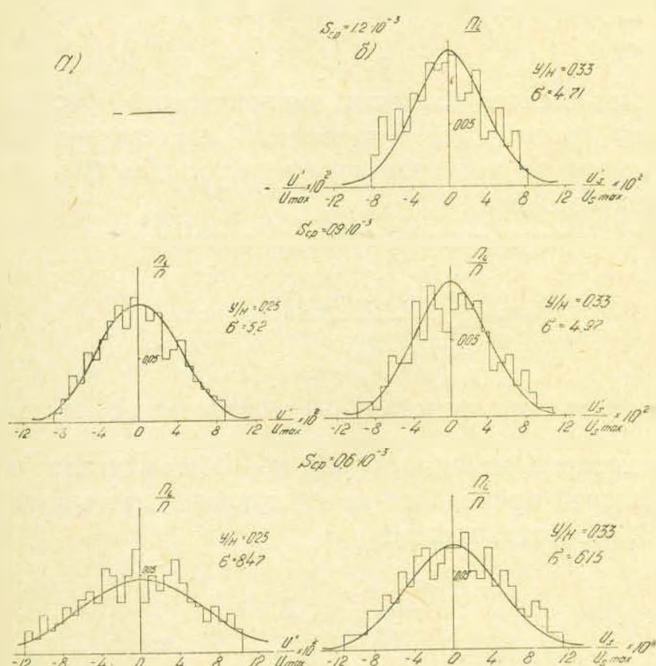


Рис. 1. Кривые распределения продольных скоростей для одной и той же точки, при трех средних мутностях потока.

а) взвешенная жидкость; б) наносы.

денным таким путем осредненным значениям продольных скоростей для твердых частиц и несущей жидкости, а также их соответствующим мгновенным значениям определялись пульсационные составляющие обеих фаз по выражению $U_s = \bar{U}_s + U_s^*$. По кривой $\bar{U}_s = f(\eta)$ определялось необходимое число траекторий для осреднения.

На рис. 1 приведены кривые распределения для одной и той же заданной точки (на глубине $H=2,0$ см от дна), но при разных средних мутностях потока. Ординаты теоретических кривых распределения определялись по выражению:

$$y = \frac{nb}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right),$$

где b — величина интервала эмпирического распределения, n — число траекторий, $t = (x - a_x)/\sigma$, σ — средне-квадратическое отклонение, a_x — среднее значение величины x .

Для построенных кривых определены их коэффициенты асимметрии и эксцесса. Необходимое условие удовлетворения полученных эмпирических кривых нормальному закону выражается равенством $\beta_1 = \beta_2 = 0$, в котором:

$$\beta_1 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} \text{ и } \beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3,$$

$$\text{где } \mu_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a_x)^m \quad m = 2, 3, 4.$$

Для оценки степени близости эмпирического распределения к теоретическому в статистике существуют критерии соответствия. В работе для указанных проверок использованы два критерия согласия (Пирсона и Колмогорова).

Критерий Пирсона определяется по выражению:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (3)$$

где $\frac{n_i}{n}$ — эмпирическая частота, p_i — теоретическая частота, r — число групп, на которое разбивался ряд, n — общее число наблюдений.

Этот критерий применялся по следующему методу оценки, предложенному В. И. Романовским:

$$\frac{\chi^2 - a_{\chi^2}}{\sigma_{\chi^2}} < 3, \quad (4)$$

$$\text{где } a_{\chi^2} = r - 1, \sigma_{\chi^2} = 2(r - 1) + \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^r \frac{1}{p_i} - r^2 - 2r + 2 \right).$$

Если удовлетворяется условие (4), то расхождение эмпирической кривой от теоретической считается случайным.

Критерий А. Н. Колмогорова, который менее силен чем χ^2 , определяется выражением

$$\lambda = D \sqrt{n}, \quad (5)$$

где D — максимальное отклонение эмпирических и теоретических кривых распределения.

Для найденного согласно (5) значения λ по таблице [3, 9] работы [8] находится значение $p(\lambda)$. Если вероятность $p(\lambda)$ будет не очень мала (не меньше 0,05), то расхождения между эмпирическими и теоретическими кривыми считаются случайными.

На рис. 2 приведены образцы кривых распределения для твердых

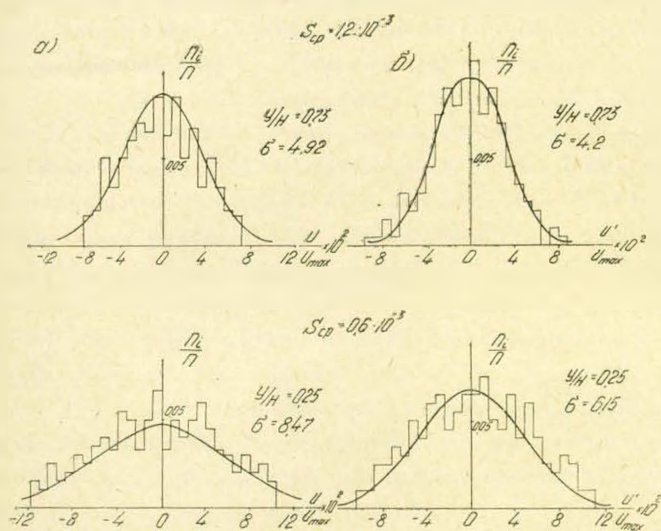


Рис. 2. Кривые распределения продольных скоростей твердых частиц и несущей жидкости для разных точек глубины
а) взвешенная жидкость; б) наносы.

частиц и наносонесущей жидкости при средней мутности $S_{cp} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ в точке $H = 2,0$ см от дна и при средней мутности $S_{cp} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ в точке $H = 4,4$ см от дна. Анализируя результаты указанных расчетов совместно со всеми кривыми распределения для семи точек по вертикали и трех средних мутностей потока, образцы которых приведены на рисунках 1 и 2, можно прийти к выводу, что кривые распределения для продольных пульсационных скоростей обеих фаз подчиняются нормальному закону. Так как с увеличением средней мутности потока интенсивность турбулентности падает (о чем свидетельствуют эксперименты авторов) значение σ_H соответственно уменьшается. Это приводит к „вытягиванию“ кривых распределений по направлению оси n_i/n , с увеличением средней мутности потока.

Полученные кривые распределения одновременно подтверждают интересный факт уменьшения относительных скоростей твердых час-
6. ТН, № 2—3.

тиц и окружающей жидкости с увеличением средней мутности потока. Кривые распределения продольной пульсационной скорости для обеих фаз с увеличением средней мутности потока приближаются друг к другу (рис. 2).

Է. Տ. ԶՐԱՇԱՅԱՆ, Գ. Մ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

ԶՐԱԲԵՐՈՒԿՆԵՐ ՏԱՐՈՂ ՀՈՍԱՆՔԻ ԸՆԴԵՐԱՅՆԱԿԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ԲԱՇԽՄԱՆ ԿՈՐԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Համասեռ հեղուկի վիճակագրական ուսումնասիրման հարցերը առաջին անգամ ձևակերպվել են դեռ 20-ական թվերին: Հետադաշում նրանք զարգացել և դարձել են ամբողջական ուղղություն տուրբուլենտության ուսումնասիրման ժամանակակից տեսության բնագավառում:

Վիճակագրական մեթոդների օգտագործումը երկֆազանի հոսանքների կիրառական ուսումնասիրման հարցերի լուծման համար համեմատաբար քիչ տարածում ունի: Տարբեր գիտնականներ իրենց աշխատանքներում բնդունում են արագությունների ընդերկայնական և վերտիկալ բաղադրիչների համար նորմալ բաշխման օրենք: Սակայն զրականության մեջ չկան էքսպերիմենտալ տվյալներ այդ հարցի լուսաբանման կապակցությամբ: Աշխատանքում բերված են երկրադարձիչ հոսանքների երկու բաղադրիչների ընդերկայնական արագությունների բաշխման կորերը հոսանքի երեք տարբեր միջին պլտորությունների առկայության պայմաններում:

Ստացված տվյալները, որոնց նմուշները բերված են 1 և 2 զծագրերում, թույլ են տալիս եզրակացնելու, որ այդ բաշխումները ենթարկվում են նորմալ բաշխման օրենքին և, որ հոսանքի միջին պլտորության մեծացման հետ հեղուկի երկու բաղադրիչների երկայնական արագությունների բաշխման կորերի միջև տարբերությունները փոքրանում են:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Einstein H. A. Der Geschlebetrieb als Wahrscheinlichkeits problem, Zürich, 1937.
2. Einstien H. A. The bed-load function for sediment transportation in open chanal flows. U. S. Departament of Agriculture, Tech. Bulletin 1026, 1950.
3. G. Polya Zur kinematik der Geschlebebewegung, Zürich, 1937.
4. Великанов М. А. Движение донных наносов. ДАН СССР, т. 3, 1945.
5. Великанов М. А. Вероятный метод расчета скачкообразного движения донных наносов. „Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме“, т. II, 1962, Ереван.
6. Абалинц С. X. Вопросы движения взвеси в открытом потоке. Тр. „САННИРИ“ в. 1958.
7. Джрбашян Э. Т., Карапетян Р. М. Установка „Следящая щель“ для измерения турбулентных характеристик потока. Тр. второй Закавказской конференции молодых научных работников по вопросам гидравлики, Тбилиси, 1952.
8. Романовский В. И. Применение математической статистики в опытном деле. Госгиздат, М., 1947.

ГИДРОЛОГИЯ

Н. А. КАРТВЕЛИШВИЛИ

НЕКОТОРЫЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНОГО СТОКА

Разработка теории регулирования речного стока для энергетических и водохозяйственных целей не связана с методами построения вероятностных характеристик стока. Но результаты практических приложений этой теории целиком зависят от того, насколько надежно заданы эти характеристики, чем и определяется значение рассматриваемого здесь вопроса. Этот вопрос разработан очень слабо, что в значительной мере объясняется его исключительной трудностью. В данной статье, не претендующей на законченные результаты, рассматриваются некоторые возможные аспекты его решения.

1. Способы задания стока как вероятностного процесса

Процесс изменения естественных (незарегулированных) мгновенных расходов $Q(t)$ в данном створе реки есть вероятностный процесс с непрерывным временем [1, 2]. Этот процесс исчерпывающе задается одним из двух следующих способов.

1. Способ канонических разложений, основанный на том, что непрерывная случайная функция $Q(t)$ может быть разложена в ряд

$$Q(t) = \varphi_0(t) + X_1 \varphi_1(t) + X_2 \varphi_2(t) + \dots, \quad (1)$$

где $\varphi_0, \varphi_1, \dots$ — неслучайные функции t , а $X_1, X_2, \dots$ — некоррелированные случайные постоянные. Способ канонических разложений неудобен для построения теории регулирования речного стока по чисто практическим соображениям, но он представляет интерес в том отношении, что показывает несостоятельность поисков, так называемых типовых гидрографов. Представление расхода $Q(t)$ типовым гидрографом, в виде $Q(t) = X \varphi(t)$, где $\varphi(t)$ неслучайная функция, определяющая собою конфигурацию гидрографа, а X случайная постоянная, зависящая от водности года, возможно только в том случае, если в разложении (1) все слагаемые, кроме второго, пренебрежимо малы (точнее, если малы величины $M X_i \max |\varphi_i(t)|$ при $i \neq 1$ причем $X_0 = 1$, а M — символ математического ожидания). Однако до настоящего времени не удалось найти ни одной реки, которая удовлетворяла бы этому условию.

2. Способ функций распределения вероятностей F_s , состоящей в задании последовательности этих функций ($s=1,2,\dots$) или соответствующих им плотностей распределения f_s ,

$$F_s(t_1, x_1; \dots; t_s, x_s) = \int_0^{x_1} du_1 \dots \int_0^{x_s} du_s f_s(t_1, u_1; \dots; t_s, u_s) \quad (2)$$

или, наконец, функций

$$F_s^*(t_1, x_1; \dots; t_s, x_s) = \int_{x_1}^{\infty} du_1 \dots \int_{x_s}^{\infty} du_s f_s(t_1, u_1; \dots; t_s, u_s). \quad (3)$$

Функция F_s есть вероятность события, состоящая в том, что мгновенный расход $Q = Q(t)$ в рассматриваемом створе удовлетворяет системе неравенств

$$Q(t_1) < x_1, \dots, Q(t_s) < x_s, \quad (4)$$

где $t_1, \dots, t_s$ — произвольные моменты времени, $x_1, \dots, x_s$ — произвольные неотрицательные числа.

Функция F_s^* есть вероятность осуществления неравенств

$$Q(t_1) > x_1, \dots, Q(t_s) > x_s \quad (5)$$

противоположных неравенствам (4).

В силу соотношения

$$F_{s-1}(t_1, x_1; \dots; t_{s-1}, x_{s-1}) = F_s(t_1, x_1; \dots; t_{s-1}, x_{s-1}; t_s, \infty), \quad (6)$$

все F_s при $s < n$ определены, если дана функция F_n .

Если существует такое n , что и при $s > n$ все F_s также определяются через функцию F_n , то процесс полностью характеризуется заданием этой функции и называется марковским процессом, многозвенным при $n > 2$ и однозвенным, простым или процессом без последствия при $n = 2$. При $n \geq 2$ функция $Q(t)$ непрерывна, если же $n = 1$ то эта функция разрывна, и процесс носит название процесса с независимыми приращениями.

В случае марковского процесса, для $s > n$ имеет место формула

$$\begin{aligned} F_s(t_1, x_1; \dots; t_s, x_s) = \\ = F_n(t_1, x_1; \dots; t_n, x_n) \prod_{k=n+1}^s \frac{F_n(t_{k-n+1}, x_{k-n+1}; \dots; t_k, x_k)}{F_{n-1}(t_{k-n+1}, x_{k-n+1}; \dots; t_{k-1}, x_{k-1})}, \end{aligned}$$

которую нетрудно вывести из теоремы умножения вероятностей. Практически любой непрерывный случайный процесс, и в частности процесс стока, можно рассматривать как марковский, если брать достаточно большое число n .

2. Выражение функций распределения вероятностей характерных расходов и стоков через функции f_s

В связи с введением системы функций f_s , возникает вопрос, каковы соотношения между этими функциями и теми характеристиками речного стока, которыми обычно оперирует гидрология: функциями распределения годовых и сезонных объемов стока и функциями распределения максимальных расходов. Этот вопрос имеет как теоретическое, так и практическое значение.

Рассматривая его, необходимо, первым делом, обратить внимание на то, что функции распределения вероятностей или (что, в конечном счете, то же самое) кривые обеспеченности максимальных расходов, принятые в инженерной практике, не являются единственным возможным средством характеристики этих расходов. Практику интересует частота превышения фактическим расходом в реке заданного значения X , независимо от генетических причин превышения. В понятие частоты превышения может быть вложено несколько различных смыслов.

1. Под частотой превышения можно подразумевать среднее количество выбросов ψ_1 случайного процесса $Q(t)$ над уровнем X (т. е. количество пересечений кривой $Q(t)$ уровня X снизу вверх) в год.

2. За эту частоту можно принять величину $\psi_2 = \Theta/T$, где Θ — среднее значение суммарного времени Θ превышения функцией $Q(t)$ значения X за год T .

3. Частоту превышения можно определить как среднее за год число ψ_3 максимумов $Q(t)$, превышающих X .

4. Наконец, частоту превышения можно определить через вероятность P непревышения годовым значением $\max_{\text{год}} Q(t)$ величины X , т. е. $\psi_4 = 1 - P$.

Это последнее определение совпадает с тем понятием обеспеченности максимального расхода X , которое принято сейчас в инженерной практике. При этом обычно нормируется величина ψ_4 и по кривой обеспеченности годовых максимумов расхода находится величина X . Принципиально, конечно, совершенно безразлично, какую из величин ψ_i ($i=1, 2, 3, 4$) нормировать, т. е. какой из кривых $\psi_i = \psi_i(X)$ пользоваться. Но так как из данных наблюдений проще всего получить кривую $\psi_4 = \psi_4(X)$ и так как весь имеющийся опыт расчета максимальных расходов относится именно к этой кривой, отдавать предпочтение какой-либо из первых трех трактовок частоты превышения перед четвертой трактовкой практически нецелесообразно. Однако, как будет видно из дальнейшего, первые три трактовки могут оказаться полезным вспомогательным средством для контроля правильности построения функций F_s или f_s .

Связь величин ψ_i с системой функций f_s вскрывается теорией выбросов случайных процессов. Согласно этой теории [3]:

$$\psi_1 = \int_t^{t+T} d\tau \int_0^\infty x' \varphi_2(\tau, X, x') dx', \quad (7)$$

где $\varphi_2(t, x, x')$ — совместная плотность распределения $Q(t)$ и производной $Q'(t)$ в момент t . Эта плотность определяется по функции F_2 о чем речь будет ниже. При достаточно широких предположениях процесс стока является процессом гармонизуемым (предположение о гармонизуемости процесса неявно, но совершенно определению, принимается во всех гидрологических расчетах). Тогда φ_2 периодически зависит от t с периодом T , и, следовательно, ψ_1 от t не зависит. Теория выбросов дает также формулу для дисперсии числа выбросов, но мы не будем ее здесь приводить, так как эта дисперсия не представляет особого интереса в рассматриваемом случае.

Величина ψ_2 определяется так [4]

$$\psi_2 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [1 - F_1(\tau, X)] d\tau = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_1'(\tau, X) d\tau. \quad (8)$$

Заметим, что развиваемая в [4] теория дает возможность определить не только первый момент $\bar{\Theta} = \psi_2 T$ случайной величины Θ , но и все последующие моменты, а в [3] указывается литература, в которой дается полное построение функции распределения вероятностей Θ (эта работа вообще содержит довольно полную библиографию по выбросам случайных процессов).

Для ψ_3 имеем следующую формулу [3]:

$$\psi_3 = - \int_t^{t+T} d\tau \int_x^\infty dx \int_{-\infty}^0 x'' \varphi_3(\tau, x, 0, x'') dx'', \quad (9)$$

где $\varphi_3(t, x, x', x'')$ — совместная плотность распределения $Q(t)$ и производных $Q'(t)$ и $Q''(t)$ в момент t .

Формулы (7), (8), (9) являются точными. Для ψ_4 точной формулы не получено. Идея приближенного решения дается в [3], здесь это решение приводится в более правильном виде. Пусть f_{s+1} плотность распределения F_{s+1} . Положим

$$t_i = t + i T/s, \quad Q(t_i) = Q_i,$$

тогда $t_s = t + T$, и вероятность того, что при $i = k$ будет $Q_k > X$, а при всех остальных i величина Q_i не будет превосходить X , выразится так:

$$p_k = \int_0^x dx_0 \cdots \int_0^x dx_{k-1} \int_x^k dx_k \cdot \int_0^x dx_{k+1} \cdots \int_0^x dx_s f_s(t_0, x_0, \dots, t_s, x_s). \quad (10)$$

Вероятность же того, что в какой-то один из моментов $t_0, \dots, t_s$ величина Q будет превосходить X , а в остальные моменты будет меньше X , представится суммой $p_0 + \dots + p_s$. Следовательно,

$$\psi_4 = \lim_{s \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^s \int_0^x dx_0 \int_0^x dx_{k-1} \int_x^\infty dx_k \int_0^x dx_{k+1} \dots \int_0^x dx_s f_s(t_0, x_0, \dots, t_s, x_s). \quad (11)$$

Практически по этой формуле можно вычислить лишь приближенное значение ψ_4 как значение суммы, стоящей в правой части формулы при достаточно большом s .

Заметим, что ψ_2, ψ_3, ψ_4 не зависят от t по тем же самым причинам, что и ψ_1 .

Определим функции φ_2 и φ_3 в формулах (7) и (9). Они выражаются через плотности распределения f_2 и f_3 соответственно. Введем вместо случайных величин $Q(t_1), Q(t_2), Q(t_3)$ следующие:

$$Q = Q(t_1), \quad Q' = \frac{Q(t_2) - Q(t_1)}{t_2 - t_1},$$

$$Q'' = \frac{\frac{Q(t_3) - Q(t_2)}{t_3 - t_2} - \frac{Q(t_2) - Q(t_1)}{t_2 - t_1}}{t_3 - t_1}.$$

Обратное преобразование выглядит так

$$Q(t_1) = Q, \quad Q(t_2) = Q + (t_2 - t_1) Q',$$

$$Q(t_3) = Q + (t_3 - t_1) Q' + (t_3 - t_2) (t_3 - t_1) Q''$$

и имеет якобиан $(t_3 - t_2) (t_3 - t_1) (t_2 - t_1)$.

Следовательно, плотность φ_3 будет

$$\varphi_3(t, x, x', x'') = \lim_{\substack{t_1 \rightarrow t \\ t_3 \rightarrow t}} (t_3 - t) (t_3 - t_1) (t - t_1) \cdot f_3\{t_1, x; t, x + (t - t_1) x'; x + (t_3 - t_1) x' + (t_3 - t_1) (t_3 - t) x''\}. \quad (12)$$

Совершенно аналогично

$$\varphi_2(t' x, x') = \lim_{t_1 \rightarrow t} (t - t_1) f_2\{t_1, x; t, x + (t - t_1) x'\}. \quad (13)$$

В качестве примера рассмотрим случай, когда функция f_n определяется на основании гипотезы, предложенной в [1, 2]. Если известно одномерное распределение вероятностей $Q(t)$, т. е. функция $f_1(t, x)$ или $F_1(t, x)$, то всегда можно построить такую функцию $\xi = \xi\{Q(t)\}$ или, иными словами $u = u(t, x)$, одномерное распределение которой будет нормальным и нормированным (рис. 1), и постулировать, что n -мерное распределение ξ , т. е. вероятность

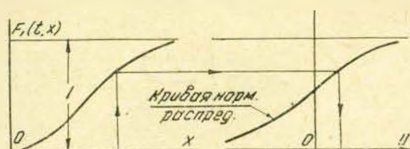


Рис. 1.

$$\Phi_n \{t_1, u_1; \dots, t_n, u_n\}$$

осуществления неравенств

$$\xi \{Q(t_1)\} < u_1, \dots, \xi \{Q(t_n)\} < u_n$$

также выражается формулой нормального закона. Это значит, что

$$f_n(t_1, x_1; \dots, t_n, x_n) = \frac{\exp(S/2D)}{\sqrt{2^n \pi^n D}} \prod_{i=1}^n \frac{\partial u(t_i, x_i)}{\partial x_i}. \quad (14)$$

Здесь S — определитель матрицы

$$\left\| \begin{array}{cccc} 1 & \rho(t_1, t_2) & \rho(t_1, t_n) & u(t_1, x_1) \\ \rho(t_2, t_1) & 1 & \rho(t_2, t_n) & u(t_2, x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho(t_n, t_1) & \rho(t_n, t_2) & 1 & u(t_n, x_n) \\ u(t_1, x_1) & u(t_2, x_2) & u(t_n, x_n) & 0 \end{array} \right\| \quad (15)$$

а D — определитель корреляционной матрицы, получающейся из (15) вычеркиванием последней строки и последнего столбца. Элементы $\rho(t_i, t_k)$ матрицы (15) могут рассматриваться либо как значения $\rho_Q(t_i, t_k)$ корреляционной функции для процесса $Q(t)$, либо как значения $\rho_\xi(t_i, t_k)$ корреляционной функции для процесса $\xi\{Q(t)\}$. Каких-либо теоретических соображений в пользу той или иной из трех трактовок привести нельзя, практически же разница между ρ_Q и ρ_ξ обычно достаточно мала. Поэтому предпочтительнее первая трактовка, как более простая.

Осуществляя предельный переход в формулах (12), (13) и им подобных, нужно иметь в виду, что

$$\lim_{t_1 \rightarrow t} \rho(t_1, t) = 1, \quad \lim_{t_1 \rightarrow t} \frac{\partial}{\partial t_1} \rho(t_1, t) = 0,$$

$$\lim_{t_1 \rightarrow t} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \rho(t_1, t) = \rho''(t) < 0.$$

Учитывая это, получим, например, для φ_2

$$\varphi_2(t, x, x') = \left[\frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \right]^2. \quad (16)$$

$$\cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[u^2(t, x) - \frac{(\partial u / \partial t + x, \partial u / \partial x)^2}{\rho''(t)} \right] \right\}.$$

Выражение функций распределения вероятностей годовых и сезонных объемов стока через функции F_s , F_s^* или f_s сопряжено с известными трудностями. Однако выражения для моментов этих функций получаются очень просто. Обозначим через $W(X)$ ту часть объема стока за некоторое время T (не обязательно равное одному году), которая образована превышениями расхода над величиной X

(рис. 2). Прием вычисления моментов $W(X)$, предложенный в [4] для $s=1, 2$, автоматически распространяется на любые s , что дает:

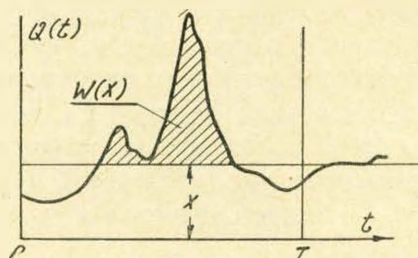


Рис. 2.

$$\overline{W^s(X)} = \int_x^\infty dx_1 \cdots \int_x^\infty dx_s \int_t^{t+T} dt_1 \cdots \int_t^{t+T} dt_s F_s^*(t_1, x_1, \dots, t_s, x_s). \quad (17)$$

Если положить здесь $X=0$, то мы получим моменты распределения полных объемов стока за время T .

3. О построении функции f_n

С точки зрения теории регулирования речного стока водохранилищами, главная задача гидрологии состоит в определении числа n и построении функции f_n или F_n , которая является единственной и исчерпывающей характеристикой притока к водохранилищу. Гидрометрические наблюдения никогда не бывают настолько репрезентативны, чтобы функцию f_n можно было построить непосредственно на их основе.

Решение этой задачи требует сочетания статистических и генетических методов, иначе говоря — построения некоторой модели процесса стока, наличие которой позволило бы нащупать структуру функции f_n с тем, чтобы из гидрометрических данных определялись лишь численные значения параметров этой функции. Однако, исследования в этом направлении сейчас находятся в самом зачаточном состоянии, и говорить о каких-либо моделях процесса еще очень рано. В данное время можно исходить не из моделей процесса стока, а лишь из тех или иных гипотез о структуре функций f_n . Одна из возможных гипотез такого рода, которую мы и будем иметь в виду, дается формулой (13).

Для построения функции f_n согласно этой гипотезе, нужно прежде всего построить функцию $f_1(t, x)$ или $F_1(t, x)$ т. е. функцию распределения вероятностей расходов $Q(t)$ в момент времени t . Практически за эти расходы можно принять расходы на определенные календарные даты. Исключение здесь составляют лишь горные ручьи ледникового питания, расход которых в летнее время резко колеблется в пределах суток. Однако, эмпирические кривые распределения

вероятностей расходов на определенные календарные даты обнаруживают очень резкие изломы, свидетельствующие, конечно, не об истинной природе этих кривых, которые по своей физической природе должны быть достаточно гладкими, а лишь о том, что репрезентативность имеющихся в нашем распоряжении гидрометрических данных недостаточна не только для построения функции F_n , но и для построения функции F_1 . Выход из этого положения заключается в том, чтобы перейти от рассмотрения мгновенных расходов $Q(t)$ к рассмотрению скользящих средних за некоторый интервал τ

$$\bar{Q}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\frac{\tau}{2}}^{t+\frac{\tau}{2}} Q(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Этот интервал может быть взят порядка декады — месяца, в зависимости от характера реки и размеров водохранилища. Такой переход означает игнорирование флюктуациями мгновенных расходов вокруг скользящих средних значений. Он равносильен предположению, что

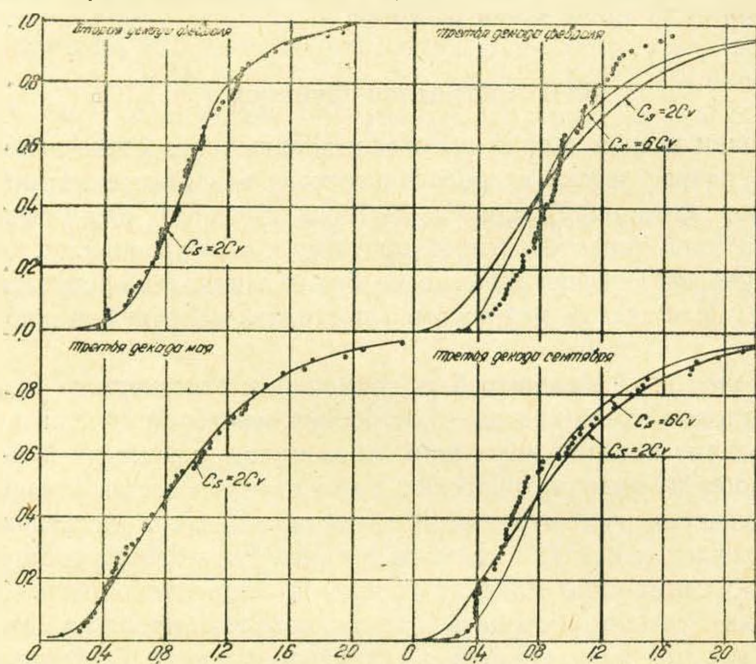


Рис. 3.

такие флюктуации не сказываются сколько-нибудь заметно на наполнении водохранилища. Это правильно для водохранилищ сезонного и более высокого регулирования, если, конечно, речь не идет о расчете водосливного фронта плотины на максимальный расход. Для таких расчетов нет необходимости строить функции F_n .

Следующий вопрос, который здесь возникает, состоит в подборе аналитического выражения для функции распределения вероятностей F_1 или ее плотности f_1 . На рис. 3 даются эмпирические функции рас-

пределения среднедекадных расходов реки Камы у Перми (незарегулированных) для некоторых значений t и кривые Крицкого и Менкеля [5], при этом расходы отнесены к своим математическим ожиданиям. Из рис. 3 видно, что в некоторых случаях (вторая декада февраля и третья декада мая) кривая Крицкого и Менкеля при $C_s = 2 C_v$ (в этом случае она вырождается в кривую Пирсона III типа) удовлетворительно передает эмпирическую функцию распределения, в других же случаях (третья декада февраля и первая декада сентября) изменение C_s в пределах от $2 C_v$ до $6 C_v$ не приводит к хорошему совпадению кривой с эмпирическими точками. Такая же картина имеет место при использовании других кривых, например, кривых Бровковича; для некоторых декад получается хорошее совпадение с опытными точками, для других же никакая вариация параметров не приводит к удовлетворительным результатам. Между тем, необходимо подобрать единое выражение, пригодное для всех t , с тем, чтобы можно было построить кривые зависимости параметров этого выражения от t (если для разных t выражения f_1 будут разными, такого построения, естественно, сделать нельзя). Выражением удовлетворяющим этому требованию (за счет выбора числа k) может быть, например, обобщенный логарифмически — нормальный закон

$$f_1(t, x) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\ln x + a_3 \ln^3 x + \dots + a_{2k-1} \ln^{2k-1} x \right) \right\}, \quad (19)$$

где $C, a_3, \dots, a_{2k-1}$ — функции t , причем C определяется из условия

$$\int_0^{\infty} f_1(t, x) dx = 1.$$

При $k > 2$ число параметров в этой формуле превышает число моментов распределения, которые могут быть достоверно определены из гидрометрического ряда. Но это не должно служить препятствием к применению формулы (19), на которую нужно смотреть только как на средство аналитического выражения эмпирической функции распределения. Поэтому параметры ее можно определять не по моментам, а по эмпирическим точкам, например, способом наименьших квадратов.

Построение корреляционной функции $\rho(t_1, t_2)$ выполняется обычным путем, а также по скользящим средним. На рис. 4 даны графики корреляционной функции реки Волги у Ярославля (для незарегулированных расходов, t_2 — момент, в который корреляционная функция равна единице). Эти графики показывают, что с увеличением $|t_2 - t_1|$ корреляционная функция быстро падает до значений, меньших по абсолютной величине, чем $0,2-0,3$, т. е. до значений, при которых вычисление этой функции становится мало достоверным. Доверять графикам корреляционной функции в этой зоне нельзя, и на основании рис. 4 можно утверждать лишь то, что в пределах реально достижимой точности расчетов корреляцию следует считать достоверной лишь

в достаточно узком интервале $2|t_2 - t_1|$. Это дает некоторые основания ожидать, что рассматриваемый процесс характеризуется малым значением числа n .

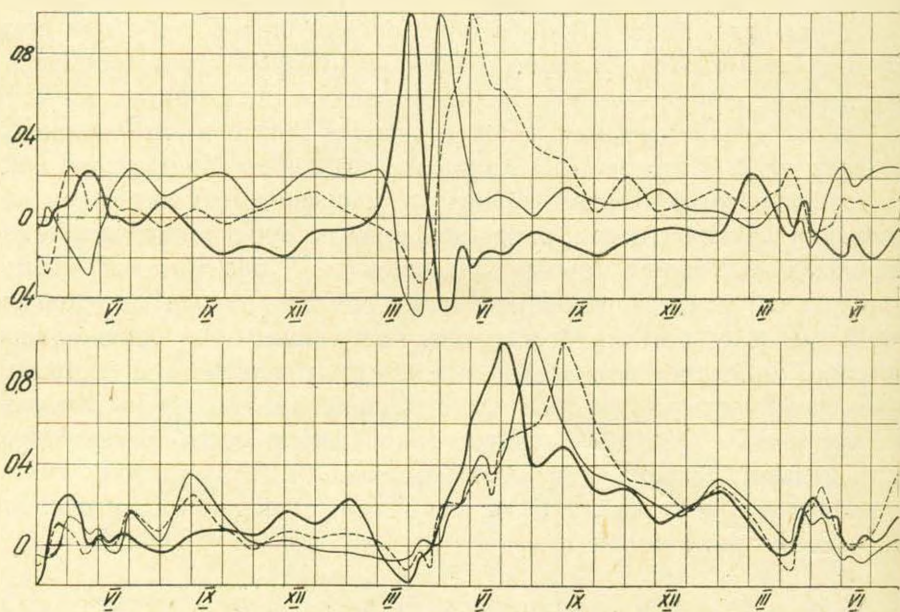


Рис. 4.

Вопрос о проверке правильности принятого значения n и правильности построения функции f_n почти не разработан. Однако здесь можно все же указать на некоторые возможности.

Рассмотрим сначала случай $n=2$, т. е. простой марковский процесс. Его характеризуют обычно не функцией f_2 , а так называемой функцией перехода

$$F(t_1 x_1 / t_2 x_2) = \frac{1}{f_1(t_2 x_2)} \int_0^{x_1} f_2(t_1, y; t_2, x_2) dy, \quad (20)$$

значения которой суть вероятности осуществления события $Q(t_2) < x_1$ при условии, что осуществилось событие $Q(t_2) = x_2$. Соответствующая условная плотность распределения будет $(t_1 = \tau, x_1 = y, t_2 = t, x_2 = x)$:

$$f(\tau, y/t, x) = \frac{f_2(\tau, y/t, x)}{f(t, x)}. \quad (21)$$

В выражении (21) никаких ограничений на t и τ не накладывается, т. е. $t \equiv \tau$. Известно, что не всякая функция четырех переменных, подчиненная ограничениям, накладываемым на любую функцию распределения вообще, может быть функцией перехода: плотность распределения функции перехода должна, как известно, удовлетворять уравнениям Колмогорова

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} f(\tau, y/t, x) + a(t, x) \frac{\partial}{\partial x} f(\tau, y/t, x) + \\ + b(t, x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(\tau, y/t, x) = 0; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} f(\tau, y/t, x) + \frac{\partial}{\partial y} [a(\tau, y) f(\tau, y/t, x)] - \\ - \frac{\partial^2}{\partial y^2} [b(\tau, y) f(\tau, y/t, x)] = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

где $a(t, x)$, $b(t, x)$ — некоторые функции, в рассматриваемом случае — неизвестные.

Перепишем уравнение (23), переименовав в нем местами τ и t , y и x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} f(t, x/\tau, y) + \frac{\partial}{\partial x} [a(t, x) f(t, x/\tau, y)] - \\ - \frac{\partial^2}{\partial x^2} [b(t, x) f(t, x/\tau, y)] = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Исключим в $b(t, x)$ из (22) и (24) и в получившееся уравнение подставим f , определенное из уравнений (14) и (21). Результат L этой подстановки не будет тождественным нулем, так как это значение f не есть точное решение уравнений (22) и (24). Если считать функцию f_i , которая достаточно достоверно строится по данным наблюдений, заданной, то

$$L = L\{\tau, y, t, x, \rho(t, \tau), \rho_t(t, \tau), a(t, x), a_x(t, x), a_{xx}(t, x)\},$$

где индексы означают дифференцирование по соответствующим переменным. Наилучшее, в смысле способа наименьших квадратов, приближение f к решению уравнений (22) и (24) будет при таком выборе корреляционной функции $\rho(t, \tau) = \rho(\tau, t)$, когда ρ и $a(t, x)$ удовлетворяют условию

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty L^2 dt d\tau dx dy = \min.$$

Это приводит к системе двух интегро-дифференциальных уравнений для определения $\rho(t, \tau)$ и $a(t, x)$. Сопоставляя $\rho(t, \tau)$, полученное из решения этих уравнений, с построенным по гидрометрическим данным, можно судить о том, насколько правильно построена плотность перехода f .

Однако этот путь исключительно сложен, прежде всего в вычислительном отношении и практически не обобщается на случай $n > 2$.

Второй путь, пригодный при любом n , состоит в следующем. Имея функцию F_n и построив функцию перехода

$$F(t_1, x_1/t_2, x_2, \dots, t_n, x_n),$$

можно по этой функции найти, методом Монте-Карло, некоторую реализацию случайного процесса сколь угодно большой длительности, по которой функция F_n может быть построена уже непосредственно. Если это построение приведет к функции F_n достаточно близкой к первоначальной, то это будет означать, что число n и функция F_n взяты правильно.

Наконец, проверка правильности выбора n и построения функции F_n может быть выполнена по формулам § 2. Функции $\psi_1(X)$, $\psi_2(X)$, $\psi_3(X)$ могут быть построены непосредственно (но в данном случае для этого надо брать гидрограф не мгновенных, а скользящих средних расходов) и сопоставлены с тем, что дает вычисление этих функций по функции f_n . Такие же расчеты могут быть произведены и по формуле (17).

Ն. Ա. ԲԱՐՔԱՆԻՇՎԻԼԻ

ԳԵՏԱՅԻՆ ՀԱՍԻՒ ՄԻ ՔԱՆԻ ՀԱՎԱՆԱԿԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Ա. Մ. Փ. Ն. Փ. Ն. Ն. Մ.

Էներգետիկական և ջրատնտեսական նպատակներով դետալին հոսքի կանոնավորման տեսության մշակումը կապված է հոսքի հալմանակալին բնութագրերի կառուցման մեթոդների հետ: Սակայն տեսության գործնական կիրառման արդյունքները ամբողջապես կախված են նրանից, թե որքանով են հոսքի տրված բնութագրերը, որով և որոշվում է արտեղ գիտվող հարցի նշանակության կարևորությունը:

Հիշյալ հարցը խորը է մշակված, որը պայմանավորվում է նրա բացառիկ գծավարությամբ: Սակայն հաշվածում, որը էի հավանում վերջնական արդյունքի, գիտվում են հարցի լուծման մի քանի հնարավոր ասպեկտներ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Картвелишвили Н. А. О математическом описании и методике расчетов регулирования речного стока. Известия АН СССР, ОТН, 1956, № 1.
2. Картвелишвили Н. А. Гидрологические основы вероятностной теории режимов энергосистем с гидростанциями. Тр. ВНИИЭ, т. 13, 1961.
3. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. Успехи физических наук, т. 77, вып. 3, 1962.
4. Линник Ю. В., Хусу А. П. Математическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании, Инженерный сборник, т. 20, 1954.
4. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. Изд. АН СССР, 1950.

ЭНЕРГЕТИКА

К. Х. ОВСЕПЯН

О РАСЧЕТЕ КАЧАНИЙ ГИДРОАГРЕГАТА ПРИ СБРОСАХ
И НАБРОСАХ НАГРУЗКИ

Для правильного управления процессами производства и распределения электроэнергии в гидроэнергосистемах наряду с электрическими процессами, необходимо изучение и гидромеханических процессов. Такое изучение необходимо как средство для получения представления о мероприятиях, обеспечивающих благоприятный исход аварийного режима и нормального переходного режима. В статье рассматриваются переходные процессы гидроагрегата, которые вызываются внезапным изменением нагрузки, но происходят при малых изменениях скорости

$$\frac{d\dot{\omega}}{dt} = 150 \div 200 \frac{\text{эл. гр.}}{\text{сек.}}$$

Возникновение этих толчков нагрузки может быть обусловлено, как обычными эксплуатационными изменениями режима, так и аварийным отклонением какого-либо элемента системы. В настоящее время, наиболее общий метод, принятый при электромеханических расчетах, является численное интегрирование уравнения агрегата, но эти расчеты весьма трудоемкие и не гарантируют от накапливающейся от интервала к интервалу ошибки. Кроме этого, целый ряд физических факторов обычно учитывается недостаточно полно или совсем не учитывается.

В излагаемой методике решения линеаризованного уравнения синхронной машины, сделана попытка учесть характеристики гидротурбины, трубопровода и автоматического регулятора скорости при расчете угла выбега гидрогенератора работающего параллельно с системой большой мощности.

Мощность, отдаваемая гидрогенератором в сеть при постоянстве э. д. с. за переходным реактансом выражается уравнением

$$P = P' + P'' = \frac{E_d U}{x_d'} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d' - x_q}{x_d' x_q} \sin^2 \delta. \quad (1)$$

Активная мощность, отдаваемая генератором, в основном, определяется первым членом уравнения. Второй член имеет значительно мень-

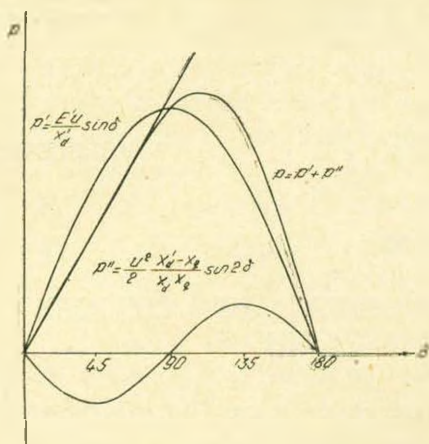


Рис. 1.

шую амплитуду и в области $0 < \delta < 90^\circ$ отрицателен (рис. 1). Из-за второго, так называемого реактивного члена максимум угловой характеристики мощности генератора смещается в область углов, больших 90° . Такое искажение синусоидальной характеристики дает возможность линеаризовать восходящую ветвь характеристики мощности на большом участке изменения угла выбега и уравнения момента генератора записать как

$$M_r = M_{r0} + k_5 \Delta \delta + k_3 c \Delta \omega;$$

или

$$M_r = M_{r0} + k_5 \Delta \delta + k_3 c \frac{\Delta \delta'}{P_n}, \quad (2)$$

где k_5 — угловой коэффициент характеристики мощности генератора;

$k_3 c$ — угловой коэффициент частотной характеристики нагрузки;

p_n — число пар полюсов генератора.

Уравнение момента турбин можем записать в виде [1]:

$$M_T = M_{T0} + k_1 \Delta \omega + k_2 \Delta h + k_4 \Delta H,$$

или

$$M_T = M_{T0} + k_1 \frac{\Delta \delta'}{P_n} + k_2 h_m \xi + k_4 H_0 \xi, \quad (3)$$

где k_1 , k_2 , k_4 — угловые коэффициенты характеристик гидротурбины;

h_m — максимальный ход штока серводвигателя;

ξ — относительное изменение давления в трубопроводе;

Подставляя выражения для момента турбины и момента генератора в основное уравнение движения ротора

$$\frac{J}{p_n} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_T - M_r$$

и произведя преобразования, получаем уравнение агрегата

$$\frac{J}{p_n k_2 h_m} \delta'' - \frac{(k_1 k_3 c)}{p_n k_2 h_m} \delta' + \frac{k_5 \delta}{k_2 h_m} = \mu + \frac{k_4 H_0}{k_2 h_m} \xi + \frac{M_n}{k_2 h_m} \lambda,$$

или

$$T_m^2 \delta'' - T_2 \delta' + \nu \delta = \mu + \tau \xi + a \lambda, \quad (4)$$

где λ — коэффициент сброса.

Величина $a \lambda$ характеризует величину избыточной энергии при скачках нагрузки. Решая уравнение агрегата совместно с уравнением регулятора скорости и жесткого гидравлического удара [1], получаем выражение для определения угла выбега при качании, вызванном внезапным изменением нагрузки

$$\delta = \frac{a \lambda}{T_m^2 \beta} \sin \beta t e^{-\alpha t}, \quad (5)$$

где α, β — соответственно действительная и мнимая части корней характеристического уравнения:

$$\alpha = \frac{-T_0 - T_T \tau k u}{2 T_M^2}, \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\gamma + u}{T_M^2} - \frac{(-T_0 - T_T \tau k u)^2}{4 T_M^4}}. \quad (7)$$

В этих выражениях коэффициент k определяется по наклону расходной характеристики гидротурбин,

а коэффициент u по параметрам регулятора скорости

$$u = \frac{1}{\omega_0 T_{\Sigma}}.$$

Действительная часть корня характеристического уравнения α является обратной величиной постоянной времени затухания и в конечном итоге характеризует продолжительность переходного процесса. Чем больше α , тем быстрее заканчивается переходный процесс. Из выражения (6) видно, что при прочих равных условиях наличие трубопровода, учтенного в данном случае явлением жесткого гидравлического удара уменьшает α , т. е. увеличивает продолжительность переходного процесса. Влияние характеристик гидротурбины и нагрузки выявляется постоянной самовывравнивания T_0 . Мнимая часть корня характеристического уравнения β характеризует частоту колебания ротора.

Из выражения (6) и (7) видно, что при увеличении длины трубопровода, увеличивается амплитуда колебаний. Подробный анализ полученных выражений показывает, что затухание качания агрегата в основном диктуется характеристиками гидротурбины и нагрузки, а период колебания определяется электрическими параметрами режима. В первый момент после изменения сопротивления связи т. е. сброса или наброса нагрузки, все изменение нагрузки распределяется пропорционально синхронизирующим мощностям P_s . Значение P_s при прочих равных условиях, обратно пропорционально значению индуктивного сопротивления до места приключения нагрузки. На основании этого принимаем, что все изменение нагрузки ΔP в первый момент распределяется обратно пропорционально сопротивлениям до генератора и до шин большой мощности (рис. 2). Если ΔP величина изменения

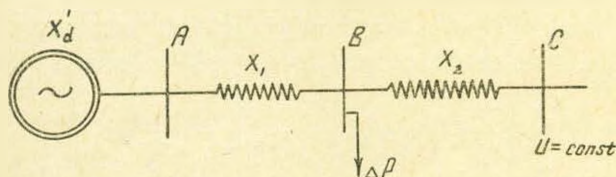


Рис. 2.

нагрузки в точке B , ΔP_r изменение нагрузки на генераторе в первый момент и $\Delta P_{\text{сист.}}$ изменение перетекаемой мощности на участке BC , то можно написать

$$\Delta P = \Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\text{сист.}},$$

$$\frac{\Delta P_{\Gamma}}{\Delta P_{\text{сист}}} = \frac{x_2}{x_1 + x_d}.$$

Откуда

$$\Delta P_{\Gamma} = \frac{\Delta P \cdot x_2}{x_1 + x_2 + x_d}. \quad (8)$$

Таким образом, относительное увеличение момента на валу генератора в первый момент включения промежуточной нагрузки или уменьшения при отключении будет равно

$$\Delta M_{\Gamma} = \frac{\Delta P}{P_{\text{ном}}} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_d}. \quad (9)$$

Увеличение отдаваемой генератором мощности происходит за счет увеличения угла между э. д. с. и вектором напряжения на клеммах генератора. Под действием синхронизирующей силы и момента связанного с затуханием переходных токов, угол выбега генератора будет уменьшаться до восстановления баланса мощностей. Процесс изменения отдаваемой генератором мощности в функции времени можно представить следующим образом (рис. 3).

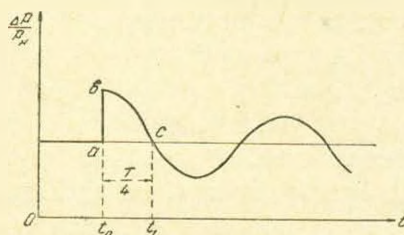


Рис. 3.

В момент времени t_0 происходит внезапное изменение отдаваемой генератором мощности на величину $ab = \Delta M_{\Gamma}$, определяемой формулой (9). Эта избыточная отдаваемая мощность будет уменьшаться и в момент t_1 будет равна нулю, однако, процесс не остановится при

достижении точки c так как относительная скорость ротора достигает здесь наибольшего значения, и ротор по инерции проходит эту точку. К моменту времени t_1 , ротор генератора будет иметь избыточную кинетическую энергию, равную площади abc . В дальнейшем под действием этого импульса ротор генератора будет совершать периодические затухающие колебания с частотой собственных колебаний, которую можно определить из (7).

Коэффициент сброса характеризующий величину избыточной энергии ротора, при скачках нагрузки, определяется по формуле:

$$\lambda = \int_0^{T/4} \Delta M_{\Gamma} \cos \beta t = \Delta M_{\Gamma} \cdot \frac{1}{\beta}. \quad (10)$$

Для оценки коэффициента запаса устойчивости, часто необходимо бывает определить максимальное отклонение угла выбега ротора. Время $t_{\text{макс}}$, в течение которого достигается $\delta_{\text{макс}}$, определяется из (5).

Это время равно

$$t_{\max} = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{\beta}{\alpha}.$$

При определении $\delta_{\max}$ по формуле (5) ее можно упростить, приближенно заменяя выражение $e^{-\alpha t_{\max}}$ более простым выражением $(1 - \alpha t_{\max})$, так как исследования показывают, что для определения максимального угла выбега первого цикла качания, погрешность такой замены не превысит 1,0%. Подставляя значение $t_{\max}$ в (5) и произведя указанное упрощение, получим окончательно

$$\delta_{\max} = \frac{a\lambda}{T_m \sqrt{\gamma + u}} (1 - \alpha t_{\max}). \quad (11)$$

Расчет качания гидроагрегата при сбросах и набросах мощности последовательными интервалами по предлагаемой формуле и сопоставление этих данных с результатами экспериментов, проведенных на электродинамической модели ИВП АН Армянской ССР (рис. 4) показывают, что результаты расчетов фактически одинаковы, но расчет по формуле (5) гораздо проще. Формула (11) для определения максимального угла выбега дает результаты, не отличающиеся от полученных при расчете всего процесса. Поэтому она может быть использована наряду с основной формулой расчета качания. Для определения влияния основных гидромеханических параметров на переходный процесс в гидроагрегате, выполнены расчеты на вычислительных машинах непрерывного действия. Учет гидравлического удара по средним значениям постоянного времени трубопровода T_T увеличивает амплитуду угла выбега первого удара. Однако, это увеличение небольшое и составляет всего несколько процентов от всего изменения угла выбега.

Более существенно влияет гидравлический удар на продолжи-

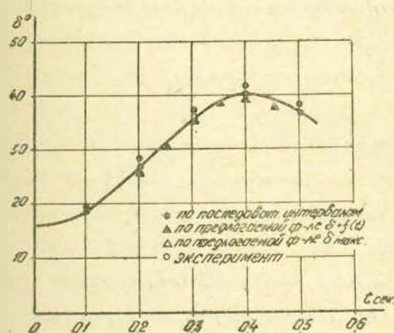


Рис. 4.

тельность переходного процесса. При постоянстве других гидромеханических параметров, наличие гидравлического удара увеличивает постоянную затухания T_d в 1,2—1,5 раза. Влияние изменения постоянной серводвигателя на переходный процесс того же порядка, что и постоянного трубопровода. Заметное влияние на переходный процесс оказывает коэффициент самовыравнивания. На рис. 5 представлены

кривые изменения угла выбега для трех различных режимов. Кривая 1 соответствует работе агрегата, не имеющего самовыравнивания турбины и нагрузки по частоте $T_d = 0$. Кривая 2 соответствует $T_d = 0,034 \text{ сек}$, а кривая 3 — $T_d = 0,067 \text{ сек}$. Как видно, с увеличением коэффициента

затухания длительность переходного процесса сильно сокращается; так если $T_0 = -0,034$ сек соответствовала постоянная времени затухания $T_\lambda = 1,91$ сек, то для $T_0 = 0,067$ сек постоянная времени $T_\lambda = 1,02$ сек.

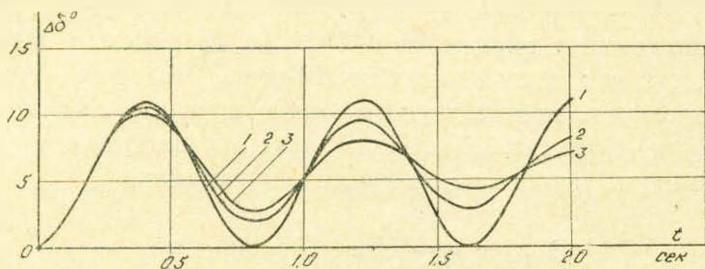


Рис. 5.

Расчеты, приведенные для различных гидромеханических параметров и анализ полученных выражений показывают, что на период колебаний ротора и амплитуду угла выбега гидромеханические параметры влияют мало, но они могут существенно изменить продолжительность переходного процесса.

4. Խ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ

ՀԻԴՐՈԱԳՐԵԳԱՏԻ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎՈՒՄԸ ՆՐԱ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ՆՎ ԲԵՌՆԱԹՎՄԱՆ ԴԵՊՐՈՄ

Ա. Մ. Փ. ՈՓ. ՈՒՄ

Սույն հոդվածում դիտվում են հիդրոաղբահեղանքի անցման պրոցեսները, որոնք առաջանում են բևեռի հանդարձակի մեծացման կամ փոքրացման ժամանակ, բայց աեղի է ունենում արագութեան փոքր փոփոխումների դեպքում:

Համառոտ լուծելով սինխրոն մեքենայի դժախացված հավասարումը (2), խորտվողաշարի հիդրոտուրբինի և արագութեան ավտոմատ կանանավորչի հավասարումների հետ ստացված է (4) արտահայտութեանը, աղբհեղատի տատանումները հաշվելու համար:

Գնեերատորի մոմենտի հարբերական փոփոխութեանը բևեռի փոփոխումից անմիջապես հետո որոշվում է (9) հավասարումից: Անկյան շեղման մաքսիմալ մեծութեանը տատանումների առաջին պարբերութեան ժամանակ կարելի է որոշել (11) մոտավոր բանաձևով:

Բերված բանաձևերի անալիզը և տարբեր հիդրոմեխանիկական պարամետրերով կատարված հաշվարկները ցույց են տալիս, որ այդ պարամետրերը փոքր աղբհեղութեան ունենալու տատանման պարբերութեան և տառչին ամպլիտուդայի վրա, բայց կարող են էապես ազդել անցման պրոցեսի տևողութեան վրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Овсепян К. Х. О расчете сбросов и набросов нагрузки при изолированной работе гидроагрегата, Известия АН АрмССР (серия ТН), т. XI, № 2. 1958.

ЭНЕРГЕТИКА

Б. Л. БУНИАТЯН

О ПОТЕРЯХ НАПОРА ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ
НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Лабораторные и натурные данные [1—3] показывают, что амплитуды колебаний уровня воды в уравнительных резервуарах по теоретическим расчетам получаются больше фактических на 10—15%. Расхождение объясняется в основном тем, что в расчетах не учитываются специфические изменения закона потерь напора, связанные с неустановившимся движением [1]. Необходимо детализировать, что именно понимается под этим несоответствием. С одной стороны, оно заключается в том, что в неустановившемся движении возникают новые компоненты потерь, отсутствующие в установившемся движении, например, компоненты связанные с обменом расходами между элементами гидравлической системы „напорный тоннель — уравнительный резервуар“. С другой стороны, это различие состоит в том, что потери напора, несомненно, связаны с формой эпюры скоростей. Следовательно, при торможении потока, когда эпюра скоростей выравнивается и при его ускорении, когда она вытягивается [1], потери напора при одной и той же средней скорости, должны быть различны между собой и должны отличаться от потерь в установившемся режиме.

В данной работе рассмотрена лишь первая из указанных сторон. Что касается второй стороны, то для ее анализа необходимы специальные экспериментальные исследования, которые до настоящего времени еще никем не предпринимались.

При неустановившемся движении несжимаемой жидкости, средняя по сечению скорость течения потока V , являясь функцией от времени, приводит к изменению гидравлических потерь и скоростного напора также в зависимости от времени. Такое движение в системе „напорный тоннель — уравнительный резервуар“ выражается колебаниями масс, при которых вода, с изменяющейся во времени скоростью движется то в одном направлении, то в другом, т. е. $0 < V < 0$. Следовательно, необосновано обычно используемое в гидравлике предположение о том, что за все время колебательного движения потери напора выражаются через квадрат скорости.

В литературе по данному вопросу приводятся лишь некоторые сведения доказывающие, что потери напора на трение при неустановившемся режиме несколько больше таковых при установившемся ре-

жиме, а для местных потерь расхождение достигает в среднем 10% [4, 5]. В работе [6] приводится аналитическое выражение для коэффициента потерь в питательных трубопроводах гидротаранных установок и доказывается, что при малых значениях V квадратичный закон образования потерь приводит к неточным результатам.

Принимая, что механизм образования потерь при неустановившемся режиме не отличается от такового при установившемся режиме, можно определить изменение скорости течения потока из уравнения

$$\frac{1}{g} \frac{dV}{dt} = - \frac{d}{dx} \left[Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} (\zeta^c + 1) \right], \quad (1)$$

где Z — отметка центра тяжести рассматриваемого сечения над плоскостью сравнения; x — соответствующая ордината; p — давление; ζ^c — коэффициент сопротивления системы; γ — объемный вес жидкости; g — ускорение силы тяжести.

Интегрируя (1) при соответствующих граничных условиях (при $x=0$, $V=0$, $Z=Z_0$, $p=p_0$; при $x=l$, $V=V_x$, $Z=0$, $p=p_x$) получим:

$$\frac{l}{g} \frac{dV}{dt} = - \left(Z_0 + \frac{p_0}{\gamma} - \frac{p_x}{\gamma} \right) + \frac{V_x^2}{2g} (\zeta^c + 1), \quad (2)$$

где l — длина тоннеля.

При $t=0$ имеем $\frac{dV}{dt}=0$, $V_x = V_0$. Следовательно,

$$Z_0 + \frac{p_0}{\gamma} - \frac{p_x}{2\gamma} = \frac{V_0^2}{2g} (\zeta^c + 1) = h^0. \quad (3)$$

После постановки (3) в (2) получим:

$$dt = \frac{2l}{(\zeta^c + 1)} \cdot \frac{dV_x}{V_0^2 + V_x^2}.$$

Откуда после интегрирования будем иметь

$$t = - T \operatorname{arctg} \frac{V_x}{V_0} + c, \quad (4)$$

где

$$T = \frac{2l}{(\zeta^c + 1)V_0}. \quad (5)$$

С учетом (3) выражение (5) принимает вид

$$T = \frac{lV_0}{gh^0}. \quad (6)$$

При $t=0$ из (4) находим

$$c = T \operatorname{arctg} \frac{V_0}{V_0} = T \frac{\pi}{4}. \quad (7)$$

В силу (4) и (7) получим

$$V_x = V_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right). \quad (8)$$

Нетрудно заметить, что при $t=0$ по формуле (8) $V_x = V_0$, а при $t=t_k$, $V_x=0$, т. е. с течением времени начальная скорость V_0 , уменьшаясь к концу времени $t_k = T \frac{\pi}{4}$, становится равной нулю. Если при неустановившемся режиме за время dt через водовод с постоянным поперечным сечением протекает некоторый объем воды, равный

$$F \int_0^t V_x dt,$$

то для протекания за это же время такого же объема воды при установившемся режиме должна существовать некоторая постоянная по времени скорость установившегося режима V_{ocp} т. е.

$$F_{ocp} t = F \int_0^t V_x dt,$$

откуда

$$V_{ocp} = \frac{1}{t} \int_0^t V_x dt. \quad (9)$$

Выразим через осредненную скорость значения следующих трех интегралов [6]:

$$\int_0^t V_x dt = V_0 \int_0^t \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) dt = V_0 T \ln \left[\sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right]; \quad (10)$$

$$\int_0^t V_x^2 dt = V_0^2 \int_0^t \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right]^2 dt = V_0^2 \left\{ T \left[1 - \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right] - t \right\}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \int_0^t V_x^3 dt = V_0 \int_0^t \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right]^3 \left\{ \frac{T}{2} \left[1 - \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - 2 \ln \left[\sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right] \right] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

Следуя В. М. Овсепяну [6], определим следующие три отношения:

$$\frac{\int_0^t V_x dt}{V_{ocp} t}; \quad \beta = \frac{\int_0^t V_x^2 dt}{V_{ocp}^2 \cdot t} \quad \text{и} \quad \beta_0 = \frac{\int_0^t V_x^3 dt}{V_{ocp}^3 t}. \quad (13)$$

Из формулировки осредненной скорости (9) имеем

$$\frac{\int_0^t V_x dt}{V_{оср} \cdot t} = 1.$$

Из выражений (9), (10) и (13) получим

$$\beta = \frac{t}{T} \frac{1 - tg \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) - \frac{t}{T}}{\left\{ \ln \left[V \sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right] \right\}^2}. \quad (14)$$

Из (9), (12) и (13) получим

$$\beta_0 = \left(\frac{t}{T} \right)^2 \frac{1 - tg^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) - 2 \ln \left[V \sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right]}{2 \left\{ \ln \left[V \sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T} \right) \right] \right\}^3}. \quad (15)$$

Анализируя формулы (14) и (15) отмечаем, что значения β и β_0 зависят от t . Используя эти свойства коэффициентов β и β_0 , определим потери при неустановившемся режиме. За промежуток времени dt через фиксированное сечение водовода при неустановившемся режиме пройдет жидкость весом $\gamma F V_x dt$. Соответствующая величина потери напора будет равна

$$\gamma F V_x dt \frac{V_x^2}{2g} (\zeta^c + 1).$$

При установившемся режиме за время dt величина потери напора

$$\gamma F \beta \frac{(\zeta^c + 1)}{2g} \int_0^t V_x^3 dt.$$

Следовательно, потери напора при неустановившемся режиме, отнесенные к единице веса жидкости, будут выражаться формулой

$$h_n^n = \frac{\beta \frac{\zeta^c + 1}{2g} \int_0^t V_x^3 dt}{\int_0^t V_x dt}. \quad (16)$$

На основании (9), (13) и (16) получим

$$h_n^n = \beta \beta_0 \frac{V_{оср}^2}{2g} (\zeta^c + 1). \quad (17)$$

При том же объеме протекшей жидкости в тот же промежуток времени, но при установившемся движении, потери h_y^n будут

$$h_y^n = \frac{V_{осп}^2}{2g} (\zeta^c + 1). \quad (18)$$

Обычно в гидравлике принимается $\zeta^c = \text{const}$. Таким образом, при неустановившемся движении потери напора при всех прочих равных условиях по сравнению с установившимся движением увеличиваются в $3\frac{1}{3}$ раз. Для проверки формул (14), (15) и (17), а также и исследования колебания уровня воды в резервуаре в лаборатории были поставлены специальные эксперименты, которые проводились на модели системы „напорный тоннель—уравнительный резервуар—трубопровод“.

Вертикальный уравнительный резервуар диаметром 40 см располагался на стыке деривационного и турбинного водоводов диаметрами по 13 см соответственно длиной 6 и 5,3 м. На конце трубопровода имелась дроссельная задвижка, которая заменяла турбину. Для записи изменения давления y^d в конце тоннеля устанавливался тензометрический датчик, присоединенный к осциллографу. Запись колебаний уровня воды в резервуаре производилась с помощью электродов, подключенных к осциллографу. С целью получения средней глубины потока четыре электрода, из хромоникелевой проволоки диаметром 0,5 мм, были установлены взаимно перпендикулярно внутри резервуара. В напорной камере модели обеспечивались условия сохранения постоянства горизонта воды в ней при сбросах и набросах нагрузки. Перепад между горизонтами в напорной камере и в уравнительном резервуаре при расходе $Q^a = 12,2$ л/сек., был равен $h_0^a = 0,148$ м. При этих данных для разных промежутков времени закрытия задвижки, равных 0,09 сек, 0,18 сек, 0,27 сек, 0,36 сек, производились осциллографические записи изменения положения уровня воды в резервуаре y^n . Результаты приведены на рис. 1.

Из представленных на рис. 1 кривых видно, что время закрытия турбины ни в какой мере не влияет на амплитуду и фазы колебаний уровня воды в резервуаре. На рис. 2 кривая y^d , показанная ранее на рис. 1, сопоставлена с экспериментальной кривой y^a .

Пользуясь экспериментальной кривой y^d , разбивая ее по интервалам времени Δt , по формуле

$$V_x = \frac{F^d \Delta y^d}{F^a \Delta t}, \quad (19)$$

были определены значения $V_x(t)$, а затем значения Δy^a по формуле

$$\Delta y^a = \frac{l}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t}. \quad (20)$$

Зная в начальном режиме потери напора в деривации при установившемся движении $h_{y_0}^d$ и коэффициент местного сопротивления $\zeta^a = 13,4$ по формуле

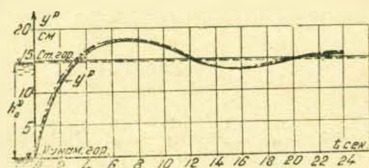


Рис. 1.

$$h_y^n = \frac{V_{оср}^2}{2g} (\zeta_d + \zeta_m + 1), \quad (21)$$

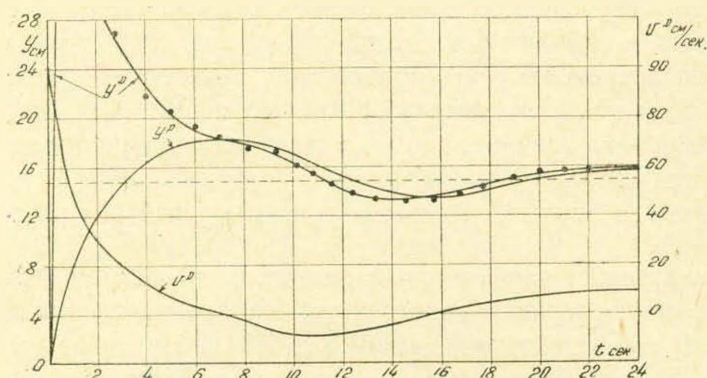


Рис. 2.

были вычислены суммы потерь и скоростного напора, показанные на рис. 3. Там же показана кривая разности y^a и y^p по данным рис. 2. Из этих кривых и произведенных подсчетов видно, что при $t=0$ имеем

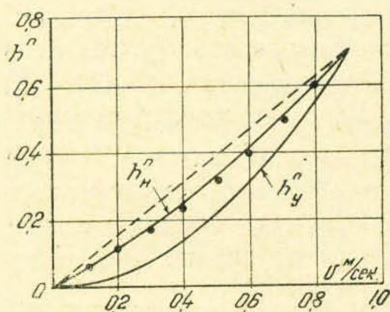


Рис. 3.

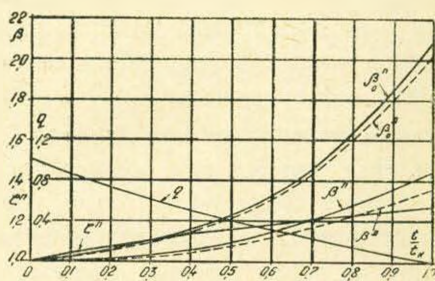


Рис. 4.

$V_x = V_0$, $h_n^n = h_y^n = h_0^n$; при $t = t_k$, $V_x = 0$, $h_n^n = h_y^n = 0$. По мере уменьшения V_x разность $h_n^n - h_y^n$ увеличивается. При малых значениях V_x разность $h_n^n - h_y^n$ значительно больше, чем при больших. Следовательно, нельзя применить квадратичный закон образования потерь для всех значений V_x .

Чтобы в этом убедиться по формулам (14) и (15) определим β и β_0 как для деривации (β^a и β_0^n), а также для деривации с учетом местного сопротивления (β^n и β_0^n). Согласно (6) для деривации $T^a = 3,73$, а для деривации с местным сопротивлением $T^n = 0,74$ сек.

Подставив в (14) и (15) $T^a = 3,73$ сек, задаваясь t находим β^a и β_0^n . Повторяя то же самое, но приняв $T^n = 0,74$, находим β^n и β_2^n . Результаты расчета приведены на рис. 4. На том же рисунке нанесены кривые относительного изменения V_x , т. е. $q = \frac{V_x}{V_0}$, полученные по

(8) для принятых выше T^A T^B . Обе эти кривые сливаются друг с другом. Кроме того, экспериментальные исследования показывают, что при установившемся режиме величина ζ^c не является постоянной и она несколько увеличивается с уменьшением расхода. Так, например, если при $V_x = V_0 = 0,9$ м/сек принять $\zeta_0^c = 1$, то при $V_x = 0,07$ м/сек получим $\zeta^c = 1,25$. Имея из экспериментов $\zeta^c(V_x)$ при помощи кривой q на рис. 4 нанесены кривые относительного изменения $\zeta^n = \frac{\zeta}{\zeta_0^c}$. Поль-

зуясь кривыми q , β^n , β_s^n и ζ^n приведенными на рис. 4, находим потери h_n^n по формуле

$$h_n^n = \beta_s^n \zeta_0^n \frac{V_x^2}{2g} (\zeta^c + 1), \quad (22)$$

показанные на рис. 3 в виде точек.

Из этого сопоставления видно, что при неустановившемся режиме потери напора заметно отличаются от таковых при установившемся режиме и кривая $h_n^n(V_x)$ близка к прямой. Другими словами изменение h_n^n в зависимости от V_x при неустановившемся режиме практически протекает по закону близкому к линейному.

В связи с указанным без существенной погрешности формулу (22) можно записать в следующем виде

$$h_n^n = \frac{A}{V_x} \frac{V_x^2}{2g} = k V_x, \quad (23)$$

где

$$\beta^n \beta_s^n (\zeta^c + 1) = \frac{A}{V_x}; \quad k = \text{const.}$$

Поступило 15.1.1963

Р. Л. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ

ՃԵՇՄԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԸ ԱՆՍԵՂՄԵԼԻ ՀԵՂՈՒԿՆԵՐԻ ՉՀԱՍՏԱՏՎԱԾ
ՀԱՐԺՄԱՆ ԳԵՊԲՈՒՄ

Ա մ ֆ ո ֆ ո ո մ

Լաբորատոր և բնական հետազոտությունները ցույց են տվել, որ հավասարակշռող ավազաններում ջրի հորիզոնի տատանման ամպլիտուդան ըստ առանձին հաշվումների 10—15% ավելի մեծ է ստացվում, քան իրականը:

Այդ տարբերությունը հիմնականում բացատրվում է նրանով, որ հաշվումներում նկատի չի առնվում ձնշման կորուստների այն առանձնահատկությունները, որոնք տեղի են ունենում շահատարված շարժման դեպքում:

Չհաստատված շարժումը բնորոշվում է (1) հավասարմամբ, և նրա լուծումից ստացվում է (8) բանաձևը, որի օգնությամբ կարելի է ստանալ հեղուկի շարժման արագության արժեքը ցանկացած ժամանակի համար:

Այնուհետև ղանգվածի շարժման քանակի և կինետիկ էներգիայի հիման վրա հոգվածում արժարժված (9)—(13) հավասարումներից ստացվում են (14) և (15) բանաձևերը, որոնց օգնությամբ կարելի է որոշել ξ և β մեծությունները, որոնք արտահայտում են ճնշման կորուստների հիշյալ առանձնահատկությունները:

Այնուհետև բնդունելով, որ կորուստների ֆիզիկան չհաստատված և հաստատված շարժումների դեպքում նույնն է, ստացվում է (17) բանաձևը, որով կարելի է հաշվել ճնշման կորուստները չհաստատված շարժման դեպքում:

Լարորատոր պայմաններում կատարած փորձերը ապացուցում են, որ (17) բանաձևը ապահովում է բանավոր ճշտություն և այն կարելի է առաջադրել փորձնական կիրառության:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Картвелишвили Н. А. О гидравлическом ударе и колебаниях жидких масс в напорных сооружениях ГЭС. Известия ОН АН Армянской ССР, т. V, 1952, № 3.
2. Манджavidze Н. Ф. К вопросу гидравлического расчета отводящих напорных тоннелей подземных гидроэлектростанций. Тр. ИЭ АН Груз. ССР, т. XIII, 1960.
3. Керселидзе Н. Б., Гвазава Г. Н., Кублашвили А. И. Лабораторные исследования неустановившихся процессов в системе «напорная деривация—уравнительный резервуар (с сопротивлением)—напорный трубопровод». Известия ТНЦГЭИ, т. II, 1958.
4. Панчурич Н. А. Гидравлические сопротивления при неустановившемся турбулентном течении в трубах. Тр. ЛИВГ, вып. XIII, 1961.
5. Doily J. M. and Deemer K. C. The unsteady-Flow Mater Tunnel at the Massachusetts Institute at Technology „Transactions of the ASME“ Jannary, 1954.
6. Овсепян В. М. Выражение гидравлических потерь через осредненную скорость при неустановившемся движении жидкости в жесткой трубе. Сб. тр. Ереванского политехнического института № 14, вып. 2, Ереван, 1957.

ЭНЕРГЕТИКА

Н. К. ИОАННИСЯН

О ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОАГРЕГАТА

Всякие возмущающие воздействия, сброс или наброс нагрузки, короткое замыкание в цепи и т. д., вызывают в гидроэнергосистемах переходные процессы. Для анализа динамической устойчивости таких систем главным образом используют прямой метод Ляпунова, который для энергосистем, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, пока мало применяется. При исследовании системы регулирования гидроагрегата для построения V функции Ляпунова можно использовать метод М. А. Айзермана для систем, содержащих линеаризованные нелинейности [1] или прием, предложенный Н. А. Картвелишвили [2], который хотя сложен в вычислительном отношении, но дает более широкие достаточные условия устойчивости, чем метод Айзермана. В работах [3], [4] рассматривается динамическая устойчивость регулируемой энергосистемы, состоящей из двух ГЭС, не имеющих деривации и работающих параллельно при постоянных и переменных э.д.с. Однако, изучение динамической устойчивости регулирования системы, состоящей из напорного трубопровода, турбины, генератора и автоматического регулятора скорости (а.р.с.), еще только начинается. Статья посвящена нахождению достаточных условий устойчивости в большой системы „напорный трубопровод—турбина—генератор“—а.р.с. с учетом нелинейностей сервомоторной и расходной характеристики. Нелинейная характеристика сервомотора $f(\sigma)$, где σ —относительное отклонение золотника от положения равновесия, определяется тем, что она непрерывна и ограничена, причем

$$\text{при } \sigma = 0, f(\sigma) = 0 \text{ и при } \sigma \neq 0, \sigma f(\sigma) > 0.$$

Учитывая [4], в настоящей работе по методу А. Н. Лурье [6] находятся достаточные условия устойчивости в большой системы трубопровод—турбина—а.р.с. только с сервомоторной нелинейной характеристикой, а затем по видоизмененному методу М. А. Айзермана [3] определяются достаточные условия динамической устойчивости системы, содержащей как сервомоторную, так и расходную нелинейные характеристики.

§ 1. Сводка уравнений элементов системы

Взяв уравнения гидроагрегата, регулятора, расходной характеристики в виде [3, 7]:

$$1 + \Delta q = (1 + \Delta \alpha) \left[k (1 + \Delta \varphi) + (1 - k) \left(1 + \frac{1}{2} \Delta \zeta \right) \right]$$

и обозначая

$$\Delta \varphi = x_1, \Delta q = x_2, \Delta \delta = x_3, \Delta x_k = x_4, \Delta \alpha = \xi,$$

где $\Delta \varphi$, Δq , $\Delta \delta$, $\Delta \zeta$, $\Delta \alpha$, Δx_k — соответственно относительные отклонения угловой скорости, расхода, электрического угла выбега, напора, открытия регулирующего органа, перемещения обратной связи регулятора, получим следующие уравнения возмущенного движения системы „напорный трубопровод—турбина—генератор—а.р.с“:

1. Уравнение гидроагрегата

$$\dot{x}_1 = b_{11} x_1 + b_{12} x_2 + b_{13} x_3 + n_1 \xi + F_1(\xi, x_1, x_2); \quad (1)$$

Уравнение напорного трубопровода (при жестком гидроударе)

$$x_2 = b_{21} x_1 + b_{22} x_2 + n_2 \xi + F_2(\xi, x_1, x_2); \quad (2)$$

уравнение связи относительного угла выбега со скольжением

$$\dot{x} = b_{31} x_1; \quad (3)$$

уравнение изодрома

$$\dot{x}_4 = p_1 \dot{\xi} - \frac{1}{T_i} x_4 + \frac{p_2}{T_i} \xi; \quad (4)$$

уравнение сервомотора

$$\dot{\xi} = f(\sigma); \quad (5)$$

уравнение золотника

$$\sigma = -\alpha x_1 - x_4. \quad (6)$$

Здесь

$$b_{11} = -\frac{2[k + M_A + (1 - k)\zeta_A]}{T_a(1 - \zeta_A)(1 - k)};$$

$$b_{12} = \frac{2(1 + M_A)}{T_a(1 - \zeta_A)(1 - k)}; \quad b_{13} = -\frac{A}{T_a};$$

$$n_1 = -\frac{1}{T_a} \left[\frac{2(1 + M_A)}{(1 - \zeta_A)(1 - k)} - \frac{1}{1 - \alpha_x} \right];$$

$$b_{21} = \frac{2k}{T_T(1 - k)}; \quad b_{22} = -\frac{2}{T_T(1 - k)}; \quad n_2 = \frac{2}{T_T(1 - k)};$$

$$b_{31} = \frac{1}{T_0}, \quad F_1(\xi, x_1, x_2) = \frac{2}{T_a(1 - \zeta_A)} \left[\frac{1 + M_A}{1 - k} \cdot \frac{\xi^2}{1 + \xi} - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{(1 - k)(1 - \alpha_x)} \xi^2 + \frac{1}{(1 - k)(1 - \alpha_x)} \frac{\xi^3}{1 + \xi} + \frac{1}{1 - k} \left(\frac{1}{1 - \alpha_x} - 1 - M_A \right) x_2 \xi + \frac{1 + M_A}{1 - k} \frac{\xi^2 x_2}{1 + \xi} - \frac{k + \zeta_A(1 - k)}{(1 - k)(1 - \alpha_x)} x_1 \xi - \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{1}{(1-k)(1-\alpha_x)} x_2 \dot{\xi}^2 + \frac{1}{(1-k)(1-\alpha_x)} \frac{x_0 \dot{\xi}^3}{1+\xi} - \\
& - \frac{\zeta_A + M_A}{2} x_1^2 - \frac{\zeta_A}{2(1-\alpha_x)} x_1^2 \dot{\xi} \Big]; \\
F_2(\xi, x_1, x_2) &= \frac{2}{T_T(1-k)} (x_2 - \xi) \frac{\dot{\xi}}{1+\xi};
\end{aligned}$$

T_a — постоянная времени инерции агрегата;

T_T — постоянная трубопровода;

a — параметр, зависящий от статической характеристики центробежного маятника;

T_i — постоянная времени выключателя;

μ_1 — кинематический коэффициент обратной связи;

μ_2 — степень отстающей неравномерности регулирования.

§ 1. Достаточные условия устойчивости в большом только при нелинейной характеристике сервомотора

Возмущенные движения исследуемой системы только при нелинейной характеристике сервомотора можно описать уравнениями (1) — (6) положив $F_1(\xi, x_1, x_2) = 0$ и $F_2(\xi, x_1, x_2) = 0$.

Исследуем устойчивость в большом этой системы по А. И. Лурье [6].

Указанная система в канонической форме будет иметь вид:

$$\dot{Z}_p = \lambda_p Z_p + f(\sigma)_{(p=1, 2, 3, 4)}; \quad (7)$$

$$\dot{\sigma} = \sum_{p=1}^4 \rho_p Z_p - \mu_1 f(\sigma), \quad (8)$$

где

$$Z_p = \xi + \frac{\lambda_p}{N_m(\lambda_p)} \sum_{\alpha=1}^3 D_{\alpha m}(\lambda_p) x_{\alpha} \quad (p=1, 2, 3); \quad (9)$$

$$Z_4 = \frac{x_4}{\mu_1 - \mu_2} - \frac{\mu_2}{\mu_1 - \mu_2} \xi. \quad (10)$$

λ_k ($k=1, 2, 3, 4$) являются корнями характеристического уравнения при выключенном регулирующем органе и определяются из многочлена

$$D(\lambda) = D_1(\lambda) \left(\frac{1}{T_i} + \lambda \right) = \lambda^4 - f_1 \lambda^3 + f_2 \lambda^2 - f_3 \lambda + f_4, \quad (11)$$

где

$$D_1(\lambda) = \begin{vmatrix} b_{11} - \lambda & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & b_{22} - \lambda & 0 \\ b_{31} & 0 & -\lambda \end{vmatrix};$$

$$f_1 = b_{11} + b_{22} - \frac{1}{T_i};$$

$$f_2 = -b_{13} b_{31} - b_{12} b_{21} + b_{11} b_{22} - \frac{1}{T_i} (b_{11} + b_{22});$$

$$f_3 = \frac{1}{T_i} (b_{13} b_{31} + b_{22} b_{21} - b_{11} b_{12}) - b_{13} b_{22} b_{31};$$

$$f_4 = \frac{1}{T_i} b_{13} b_{22} b_{31}.$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ считаются различными и определяются из уравнения $D_1(\lambda) = 0$,

$$\lambda_4 = -\frac{1}{T_i}.$$

$N_m(\lambda_p)$ представляет собой определитель $D_1(\lambda_p)$, где m -ый столбец ($m = 1, 2, 3$) заменен числами $n_1, n_2, 0$. В выражении (9) m подбирается так, чтобы $N_m(\lambda_p) \neq 0$.

$D_{\alpha m}$ представляет собой алгебраическое дополнение m -го столбца и α -строки того же определителя $D_1(\lambda_p)$.

$$\beta_k = \frac{a N_1(\lambda_k)}{D_1(\lambda_k)} \quad (k = 1, 2, 3), \quad \beta_4 = \frac{n_1 - n_2}{T_i}$$

Очевидное решение системы (7)–(8) является

$$Z_k = \sigma = 0 \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

Следуя [6] динамическая устойчивость равновесного состояния (12) системы (7)–(8) сводится к определению вещественных значений корней системы уравнения

$$2 \sqrt{\beta} (t_0 \sigma_4 + t_1 \sigma_3) - (t_0 \sigma_3)^2 + B_1 = 0; \quad (13)$$

$$2 \sqrt{\beta} (t_0 \sigma_6 + t_1 \sigma_5 + t_2 \sigma_4 + t_3 \sigma_3) + (t_0 \sigma_4 + t_1 \sigma_3)^2 - \\ - 2 t_0 \sigma_3 (t_0 \sigma_5 + t_1 \sigma_4 + t_2 \sigma_3) + B_3 = 0; \quad (14)$$

$$2 \sqrt{\beta} (t_3 \sigma_{-3} + t_2 \sigma_{-2} + t_1 \sigma_{-1}) + (t_3 \sigma_{-2} + t_2 \sigma_{-1})^2 - \\ - 2 t_3 \sigma_{-1} (t_3 \sigma_{-3} + t_2 \sigma_{-2} + t_1 \sigma_{-1}) + B_{-3} = 0; \quad (15)$$

$$2 \sqrt{\beta} t_3 \sigma_{-1} - (t_3 \sigma_{-1})^2 + B_{-1} = 0, \quad (16)$$

где

$$B_{1,r} = \sum_{p=1}^4 \beta_p \lambda_p^{r-1}; \quad \sigma_3 = 1; \quad \sigma_4 = f_1;$$

$$\sigma_5 = f_1^2 - f_2; \quad \sigma_6 = f_1^3 - 2 f_1 f_2 + f_3; \quad \sigma_{-1} = -\frac{1}{f_4};$$

$$\sigma_{-2} = -\frac{f_3}{f_4^2}; \quad \sigma_{-3} = \frac{f_2}{f_4^2} - \frac{f_3^2}{f_4^3}; \quad \sigma_{-4} = -\frac{f_1}{f_4^2} + \frac{2 f_2 f_3}{f_4^3} - \frac{f_1^3}{f_4^4}.$$

Из (16) находим

$$t_3 = \frac{V \mu_1 + \varepsilon V \mu_1 + B_{-1}}{\sigma_{-1}} = D, \quad \varepsilon = \pm 1.$$

Так как

$$B_{-1} + \mu_1 = \Gamma^2$$

положительное число, то $t_3 = \Delta$ является вещественной величиной. Поэтому, величина t_1 , полученная из (13)

$$t_1 = \frac{1}{2\sqrt{\mu_1}} t_0^2 - \sigma_4 t_0 - \frac{B_1}{2\sqrt{\mu_1}}$$

также будет вещественной величиной.

Подставляя значения t_3 и t_1 в (14) и (15), находим:

$$t_2 = \frac{\frac{1}{4\mu_1} t_0^4 - \frac{\sigma_4}{\sqrt{\mu_1}} t_0^3 + \left(2\sigma_4^2 - \sigma_5 - \frac{B_1}{2\mu_1}\right) t_0^2}{2(t_0 - \sqrt{\mu_1} \sigma_4)} +$$

$$+ \frac{\left(\frac{B_1 \sigma_4}{\sqrt{\mu_1}} + 2\sqrt{\mu_1} \sigma_6 - 2\sqrt{\mu_1} \sigma_4 \sigma_5\right) t_0 + B_3 - B_1 \sigma_5 + 2\sqrt{\mu_1} \Delta + \frac{B_1^2}{4\mu_1}}{2(t_0 - \sqrt{\mu_1} \sigma_4)}; \quad (17)$$

$$a_{11} t_0^2 + a_{22} t_2^2 + 2a_{13} t_0 + 2a_{23} t_2 + a_{33} = 0. \quad (18)$$

Здесь

$$a_{11} = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_{-1} \Delta}{\sqrt{\mu_1}}\right), \quad a_{22} = \sigma_{-1}^2, \quad a_{23} = \sqrt{\mu_1} \sigma_{-2};$$

$$a_{13} = \sigma_4 \sigma_{-1} (\sigma_{-1} \Delta - \sqrt{\mu_1});$$

$$a_{33} = 2\sqrt{\mu_1} \Delta \sigma_{-3} + B_{-3} + B_1 \sigma_{-1} \left(\frac{\Delta \sigma_{-1}}{\sqrt{\mu_1}} - 1\right) + \Delta^2 (\sigma_{-2}^2 - 2\sigma_{-1} \sigma_{-3}).$$

Подставляя значения исходных параметров, не трудно показать, что

$$a_{11} > 0, \quad \delta = a_{11} a_{22} > 0$$

и поэтому (17) представляет собой уравнение эллипса

$$\frac{\left(t_0 + \frac{a_{13}}{a_{11}}\right)^2}{\left(\sqrt{-\frac{\Delta}{a_{11} \delta}}\right)^2} + \frac{\left(t_2 + \frac{a_{23}}{a_{22}}\right)^2}{\left(\sqrt{-\frac{\Delta}{a_{22} \delta}}\right)^2} = 1. \quad (18^1)$$

Таким образом, если система уравнений (17) и (18) имеет вещественный корень, то невозмущенное движение асимптотически устойчиво в большом.

При жестком выключателе ($T_i = \infty$), как показал А. И. Лурье, достаточные условия асимптотической устойчивости системы (1)–(6) сводятся к критериям

$$M = \frac{1}{4} (\mu_1 \Gamma f_3^*)^{-\frac{2}{3}} [B_1 + \mu_1 (f_1^{*2} - 2f_2^*)] > 0; \quad (19)$$

$$N = -\frac{1}{4\Gamma} (\mu_1 \Gamma f_3^*)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{2f_1^* f_3^* - f_2^{*2}}{f_3} \Gamma^2 + f_3^* B_{-3} \right) > 0. \quad (20)$$

Здесь

$$f_1^* = b_{11} + b_{22}, f_2^* = b_{11} b_{22} - b_{12} b_{31} - b_{12} b_{21}, f_3^* = -b_{13} b_{31} b_{22}.$$

Если хотя бы одно из условий (19) — (20) не выполняется, то асимптотическая устойчивость сводится к критерию

$$F(M, N) = M^3 + N^3 - M^2 N^2 - \frac{9}{8} MN + \frac{27}{256} > 0. \quad (21)$$

При отсутствии изодромной обратной связи ($T_i = 0$) достаточные условия асимптотической устойчивости установившегося состояния определяются также по критериям (19), (20), (21), только в них μ_1 заменяется μ_2 .

§ 3. Достаточные условия динамической устойчивости системы, содержащей нелинейные характеристики сервомотора и расхода

Перейдем к нахождению критерия устойчивости, когда система напорный трубопровод—гидроагрегат—а.р.с. кроме сервомоторной нелинейной характеристики, содержит также расходную нелинейную характеристику. С этой целью воспользуемся видоизмененным методом М. А. Айзермана [3].

Дифференциальные уравнения исходной нелинейной системы (1) — (6) в новых переменных запишутся так:

$$\dot{Z}_p = \bar{\lambda}_p Z_p + f(\sigma), \quad p = 1, 2, 3, 4, \quad (22)$$

$$\dot{\sigma} = \sum_{p=1}^4 \bar{\beta}_p Z_p - \mu_1 f(\sigma), \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_k &= \lambda_k + \frac{\psi_k}{Z_k}, \bar{\lambda}_4 = \lambda_4 \quad (k=1, 2, 3), \\ \bar{\beta}_k &= \beta_k \frac{\lambda_k}{\lambda_k} \quad (k=1, 2, 3), \quad \bar{\beta}_4 = \beta_4, \end{aligned}$$

$$\psi_k(\zeta, Z_1, \dots, Z_4) = \frac{\lambda_k}{N_m(\lambda_k)} \cdot [D_{1m}(\lambda_k) F_1(\zeta, Z_1, \dots, Z_4) + D_{2m}(\lambda_k) F_2(\zeta, Z_1, \dots, Z_4)].$$

($k=1, 2, 3$)

Достаточные условия устойчивости в большом нулевых решений системы (22) — (23) при $Re \bar{\lambda}_p < 0$ ($p=1, 2, 3, 4$) и сохранении характера корней находятся также по [6].

Пример. Определим достаточные условия динамической устойчивости регулирования гидротурбины Лаборатории гидроагрегатов ИВП АН Армянской ССР при следующих начальных данных:

Примем установившийся режим работы гидротурбины при полной нагрузке, т. е. $\zeta_0 = \varphi_0 = \alpha_0 = 1$.

$\omega_0 = 104, 7^\circ/\text{сек}$; $M_{T(0)} = 7,5 \text{ кгм}$; $H_0 = 5,0 \text{ м}$; $Q_0 = 190 \text{ м}^3/\text{сек}$; $\delta_0 = 24^\circ$; $a = 3,125$; $\mu_1 = 1,36$; $\mu_2 = 0,05$; $T_0 = 0,00318 \text{ сек}$; $T_a = 20 \text{ сек}$; $\alpha_x = 0,276$; $T_T = 2,0 \text{ сек}$; $T_i = 10 \text{ сек}$.

На основании этих данных находим:

$N_0 = 7,706 \text{ кмт}$; $\zeta_A = -0,35$; $M_A = 0,177$; $\kappa = 0,3$; $A = \text{ctg } \delta_0 = 2,264$;
 $b_{11} = -0,0271$; $b_{12} = 0,1271$; $b_{13} = -0,1123$; $b_{21} = 0,4286$; $b_{22} = -1,4286$;
 $n_1 = -0,0581$; $n_2 = 1,4286$; $b_{31} = 314,1593$.

Тогда корни выключенного регулирования без учета нелинейностей F_1 и F_2 будут равны:

$$\lambda_1 = -1,4305; \lambda_{2,3} = -0,0126 \pm i 5,9353, \lambda_4 = -0,1.$$

В силу (17) и (18) получим:

$$t_2 = \frac{0,1838 t_0^4 + 1,334 t_0^3 + 36,0153 t_0^2 + 3,4463 t_0 - 15,5821}{2(t_0 + 1,8143)}; \quad (I)$$

$$\frac{(t_0 + 1,82)^2}{58,95^2} + \frac{(t_2 + 62,82)^2}{57,89^2} = 1. \quad (II)$$

Графики функции (I) и (II) показаны на рис. 1. Как видно из рисунка обе кривые пересекаются. Отсюда следует, что система разрешающих уравнений (I) и (II) имеет вещественные корни и, следовательно, равновесное состояние системы (1)–(6) без учета нелинейностей F_1 и F_2 асимптотически устойчиво в большом.

Принимая $x_1 = x_3 = 0,05$, $x = -0,06$ и $\xi = -0,10$ и производя соответствующие расчеты по указанному методу найдем, что $\bar{\lambda}_1 = -1,5905$; $\bar{\lambda}_{2,3} = -0,01424 \pm i 5,93806$; $\bar{\lambda}_4 = \lambda_4 = -0,10$.

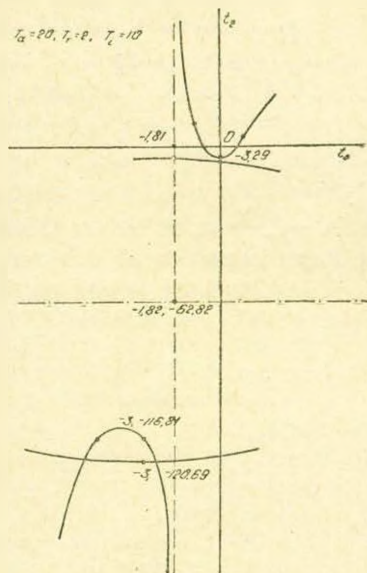


Рис. 1.

Отсюда очевидно, что найденные корни удовлетворяют достаточным условиям динамической устойчивости системы (1)–(6)

Поступило 15.I.1963 г.

Н. Ч. БОУНЕНКО

ՀԻՊԲԱԳՐԵԳՄԱՏԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
 ԲԱՎԱՐԱՐ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հոդվածում, օգտագործելով Ա. Ի. Լուրյեի և Մ. Ա. Ալեկսևի մեթոդները, քննարկվում են հիդրոգեներատորային ազրեգատի կարգավորման դինամիկ կայունության բավարար պայմանները:

§ 1-ում բերված են ճնշման խողովակաշար-հիդրոտուրբին-գեներատոր-կարգավորիչ սխեմի հավասարումները (1–6), ուր ելքի և սերվոշարժիչի խարակտերիստիկները ոչ գծային են:

§ 2-ում *Լուրջի մեթոդով հետադադարում են հիշյալ սխեմայի դինամիկ կայունության բավարար պայմանները, երբ (1)–(6) սխեմայի ունի մեկ ոչ գծային հավասարում — սերվոշարժիչի ոչ գծային խարակտերիստիկը: Այդ դեպքում դինամիկ կայունության բավարար պայմանի համար անհրաժեշտ է որպեսզի (17)–(18) հավասարումների սխեմայի ունենա իրական արժան: Մեկ թվային օրինակով ցույց է տրվում, որ դինամիկ կայունության բավարար պայմանն ապահովում է, քանի որ (17) կորը և (18) էլիպսն ունեն հասման կետ (նկ. 1):*

§ 3-ում քննարկվում են (1)–(6) սխեմայի դինամիկ կայունության բավարար պայմանները, երբ տվյալ սխեմայում, բացի սերվոշարժիչի ոչ գծային խարակտերիստիկից, պարունակում է նաև F_1 և F_2 ոչ գծային ֆունկցիաները, որոնցից էականը ելքի ոչ գծային խարակտերիստիկն է:

Տվյալ հոդվածը, բացի տեսական նշանակությունից, ունի նաև պրակտիկ նշանակություն, քանի որ հիդրոագրեգատի դինամիկ կայունության կարգավորման բավարար պայմանները դեռևս քիչ են ուսումնասիրված:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Айзерман М. А. Теория автоматического регулирования двигателей. М., 1952.
2. Картвелишвили Н. А. Переходные процессы в энергетических системах как задача общей теории колебаний. Известия АН СССР, ОТН, 1960, № 2.
2. Аронович Г. В. К определению достаточных условий динамической устойчивости энергетических систем. Тр. Всесоюзного НИИ электроэнергетики, т. 9, 1959.
4. Аронович Г. В. К определению достаточных условий динамической устойчивости сложной энергосистемы при переменных э.д.с. Известия ВУЗ Радиофизика, т. 2, № 3, 1959.
5. Лурье А. И., Розенwasser Е. Н. О методах построения функции Ляпунова в теории нелинейных регулируемых систем. I международный конгресс ИФАА по автом. управ., М., 1960.
6. Лурье А. И. Некоторые нелинейные задачи теории автоматического регулирования. М.—Л., 1951.
7. Картвелишвили Н. А. Неустойчившиеся режимы в силовых узлах гидроэлектрических систем, ГЭИ, М., 1951.
8. Летов А. М. Устойчивость нелинейных регулируемых систем. М., 1958.
9. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. М.—Л., 1952.
10. Гаркави Ю. Г. Смирнов М. И. Регулирование гидротурбин. М.—Л., 1954.

ГИДРОТЕХНИКА

А. К. АНАНЯН, Б. И. БЕК-МАРМАРЧЕВ, В. Н. ЖАМАГОРЦЯН,
А. М. МХИТАРЯН

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ
ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В ВОДОЕМАХ

Проблема уменьшения потерь воды на испарение с поверхности естественных и искусственных водоемов имеет народно-хозяйственное значение особенно для засушливых районов нашей страны. Значение проблемы, а также состояние вопроса с достаточной полнотой охарактеризованы в [1, 2]. Несмотря на многочисленные исследования, которые велись и ведутся в этой области за границей, результаты их могут быть отчасти использованы нами только в методическом отношении, так как применяемый в мировой практике химикат, способствующий сокращению испарения, в Советском Союзе в промышленном масштабе не производится. Наиболее обнадеживающие результаты были получены в лабораторных условиях для так называемых спиртов из вторых цеомыляемых, по ряду показателей конкурирующих с импортными метиловыми спиртами (типа гекса- и октадеканоль).

К исследованиям в этом направлении Институт водных проблем (ИВП) Академии наук Армянской ССР приступил во втором полугодии 1960 года. Результаты этих работ опубликованы в [3].

Основная задача исследований 1961 и 1962 годов заключалась в испытании в натуральных условиях, на экспериментальной базе Института в Арданише (побережье оз. Севан), спиртов из вторых цеомыляемых отечественного производства с целью установления пригодности их для уменьшения испарения с поверхности водоемов. Это потребовало постановки ряда предварительных и параллельных опытов в водных бассейнах и испарителях в лабораторных и в полевых условиях. Задача опытов заключалась в установлении свойств указанного химиката в отношении сопротивления сдуванию под действием ветра, скорости его распространения и восстановления сплошности пленки после прекращения ветра. Кроме того подлежала установлению минимальная норма расхода химиката и эффективность его в смысле уменьшения испарения. Для этих целей в открытой лаборатории Института водных проблем был построен бетонный бассейн размерами в плане 13×50 м с высотой бортов в 1,4 м и наполнении 1,3 м. Площадь зеркала воды—650 кв. м (рис. 1 и 2). В одном конце бассейна по всей

его ширине установлен плоский щит волнопродуктора. К противоположному концу примыкают две аэродинамические трубы длиной по 10 м, шириной выходного отверстия 6,5 м (ширина одного стенда соответствует половине ширины бассейна). Высоту выходного отверстия

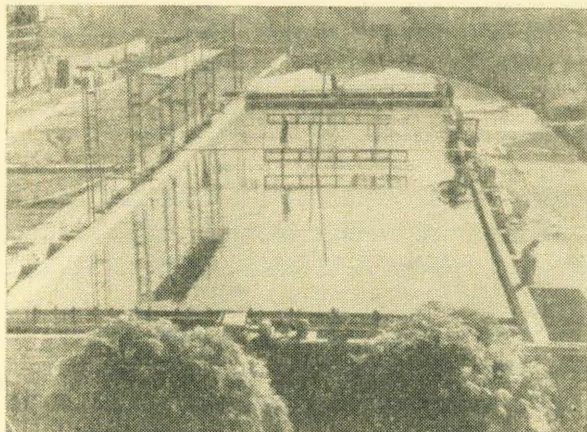


Рис. 1. Общий вид опытного бассейна в Норкской лаборатории ИВП.

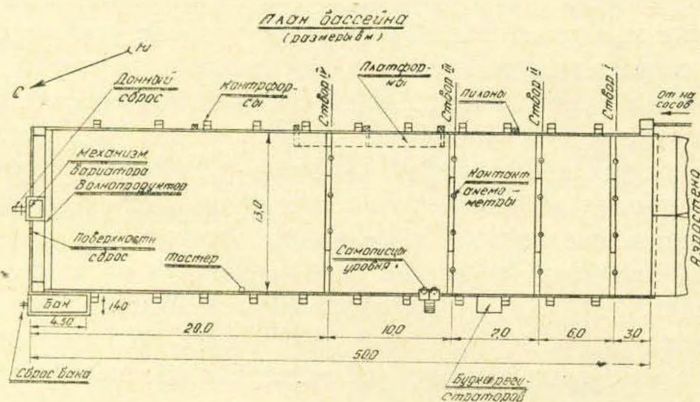


Рис. 2. План опытного бассейна Норкской лаборатории.

стенда можно по желанию менять от самого минимума до 50 см. В плане каждый стенд имеет вид плоского диффузора плавного очертания, осуществляющего на длине 8 м переход от начальной ширины в 70 см, соответствующей ширине выходного отверстия кожуха вентилятора, к ширине в 6,5 м. Стенд состоит из деревянного каркаса, обшитого фанерой, оклеенной изнутри плотной бумагой, препятствующей утечке воздуха через щели. Каждый стенд снабжен центробежным вентилятором типа ЦБ-55 производительностью 40.000 куб. м воздуха в час, работающего от электромотора мощностью 20 квт, при 970 об/мин. Для измерения, при работе аэростендов, скоростей воздушного потока в любой точке над водной поверхностью бассейна использовались трубки Пито и контактные анемометры с автоматиче-

ской записью, а также обыкновенные гидрометрические вертушки. Уровни воды в бассейне измерялись тастерами и лимниграфами.

Первый опыт, который был поставлен в указанном бассейне относится к задаче установления влияния пленки на величину сокращения испарения. В опытах 1961 года в центре бассейна были установлены погруженные в воду два испарителя площадью 0,3 кв.м (ГГИ—3000), а рядом с бассейном—испаритель (бак) площадью 6,5 кв. м. На поверхность воды в бассейне, а также в один из испарителей подавались спирты из вторых неомыляемых по норме 0,02 г на один кв. м в сутки. Второй испаритель и бак являлись контрольными, и в них химикат не подавался. Распространение химиката по поверхности воды происходило с большой скоростью, которая составляла в среднем 4—5 см/сек.

Величина двухмерного давления в пленке устанавливалась с помощью набора индикаторов, изготовленных в лаборатории олеоколлоидов и монослоев Института физической химии АН СССР (руководитель проф. А. А. Трапезников) из смеси додецилового спирта и вазелинового масла. В набор вошли индикаторы для двухмерных давлений от 0,1 до 29,2 дин/см.

Процентное содержание додецилового спирта в индикаторах приведено в следующей таблице.

№№ индикаторов	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Двухмерное давление	0,1	4,3	9,0	13,8	18,6	20,7	22,8	28,3	29,3
Содержание додецилового спирта	0,072*	0,1996	0,3003	0,5013	0,701	1,00	1,4996	2,0016	2,4816

К сожалению, в 1961 г. данным набором индикаторов был охвачен не весь диапазон двухмерных давлений. Поэтому не было возможности их регистрировать при значениях, близких к оптимальному (40 дин/см). Поэтому двухмерное давление, превосходящее 29,2 дин/см, определялось с помощью динамометра, сконструированного в лаборатории Института физической химии АН СССР [4]. В 1962 г. этой же лабораторией были представлены индикаторы (от № 11 до № 15), изготовляемые из так называемых „Башкировских“ спиртов и в различных пропорциях фракций C_8 — C_{12} из вторых неомыляемых с гидроксильным числом 319,8.

Нанесение индикаторов производилось с помощью капельниц. Сохранение капли на пленке указывало на то, что двухмерное давление в ней больше давления, соответствующего данному индикатору. При меньшем давлении в пленке капля растекалась. После полного покрытия поверхности воды в бассейне химикатом, двухмерное давление в

* В процентах от веса вазелинового масла. Для окраски индикатора к нему добавлялась сажа в количестве 2, 3%.

пленке достигало 35–40 дин/см . Опыты с пленкой охватили период с максимальными температурами воздуха: они начались 14 июня и закончились 1 августа. Результаты обработки опытов приведены на рис. 3. На вертикальной оси отложено испарение в миллиметрах, а на горизонтальной оси—время в сутках. Сплошной линией показана интегральная кривая испарения без пленки; пунктирной линией—испарение при наличии на поверхности бассейна пленки. Как видно, суммарное испарение (при отсутствии пленки) с 14 июня по 1 августа было 42 мм, а с пленкой 22 мм. Отсюда следует, что испарение при наличии пленки сократилось на 48%.

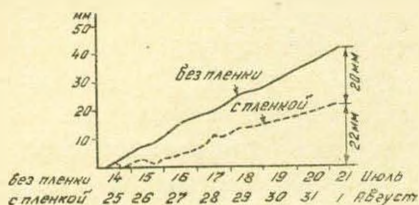


Рис. 3. Интегральные кривые разностей понижений уровней в бассейне и баке без пленки и с пленкой (в бассейне).

площадью каждый 35 кв. м (5×7) м и глубиной 1,4 м, примыкающих друг к другу и обнесенных по всему контуру стенкой из пемзоблоков. Фильтрация из этих резервуаров отсутствовала. Опытами была охвачена более холодная половина лета и часть осени. Эффект от применения тех же поверхностноактивных веществ получился более низким, чем в предыдущем году, а именно 32–35% и при подаче химиката в два приема по норме $0,025 \text{ г/м}^2$. Одновременно было выяснено влияние ветра на эффективность пленки. В безветренную или слабоветренную погоду относительная величина сокращения испарения превосходила 50%, особенно при подаче химиката в два приема (утром и вечером).

На водно-испарительной площадке Арданишской экспериментальной базы в 1961–1962 годах были поставлены опыты с теми же химикатами с целью выяснения влияния на величину сокращения испарения расхода вещества в единицу времени на единицу площади. Опыты велись на семи одинаковых испарителях, площадью 1 м^2 и глубиной 0,6 м. В шесть из этих испарителей подавался один и тот же химикат в различных количествах ($q \text{ г/м}^2$), седьмой оставался для контроля. Результаты опытов представлены на рис. 4. Из рассмотрения кривых следует, что увеличение расхода вещества при малых абсолютных значениях этого расхода приводит к довольно заметному росту процента сокращения испарения (кривая 2) и, особен-

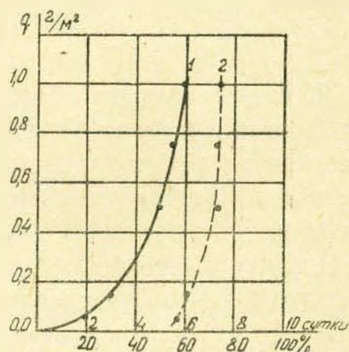


Рис. 4. Графики зависимости продолжительности (1) срока, когда имеет место эффективное сокращение испарения, и процента сокращения (2) от расхода химиката.

ношение кривых следует, что увеличение расхода вещества при малых абсолютных значениях этого расхода приводит к довольно заметному росту процента сокращения испарения (кривая 2) и, особен-

но, продолжительности срока, при котором имеет место эффективное сокращение испарения (кривая 1). Дальнейшее увеличение расхода химиката, как видно из кривых, нецелесообразно.

На двух испарительных бассейнах, площадью 3 м^2 и глубиной 2 м , изучался температурный режим воды при наличии пленки и без нее. Результаты этих опытов приведены на рис. 5. На рисунке

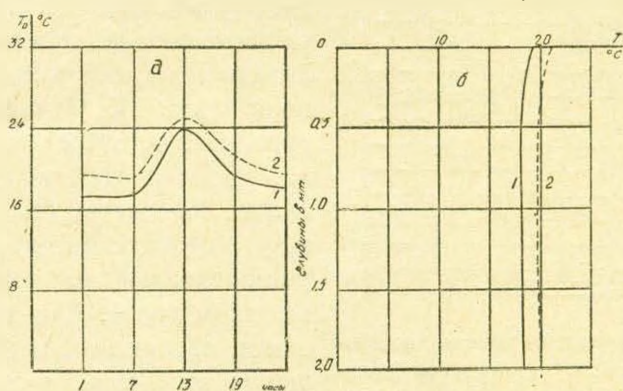


Рис. 5. Суточный ход температуры поверхности воды (а) и изменение температуры по глубине (б). 1—без пленки, 2—при наличии пленки.

показан суточный ход (а) температуры поверхности воды и профиль температуры (б) в случае чистой воды (кривые 1) и при наличии пленки (кривые 2). Во время этих опытов величина сокращения испарения устойчиво держалась в пределах 45–52%. Как видно из рис. 5, температура воды под пленкой хорошо следует за ходом температуры воды без пленки, разница составляет около 2°C при указанном выше сокращении испарения. Кроме того, повышение температуры воды под пленкой имеет место во всем объеме. На таком же испарительном бассейне приводился опыт одновременной подачи того же химиката в количестве $0,5 \text{ г/м}^2$ после чего проводились в течение 10 суток синхронные наблюдения в данном испарителе и в контрольном испарителе тех же размеров, но с чистой водой. Результаты опытов, представленные на рис. 6, показывают, что наибольшее сокращение испарения имеет место в первые сутки. При этом растет разность температур воды под пленкой и в контрольном испарителе. После того как на пятые сутки пленка теряет защитные свойства, испарение с рабочего испарителя становится больше, чем с

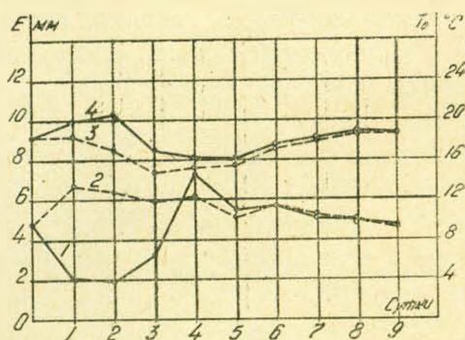


Рис. 6. Ход температуры воды и испарения. 1—испарение при пленке; 2—испарение без пленки; 3—температура чистой воды; 4—температура воды под пленкой.

наибольшее сокращение испарения имеет место в первые сутки. При этом растет разность температур воды под пленкой и в контрольном испарителе. После того как на пятые сутки пленка теряет защитные свойства, испарение с рабочего испарителя становится больше, чем с

контрольного, вследствие указанной разности температур. Лишь к началу десятых суток испарение и температура в обоих испарителях выравниваются.

Опыты на испарителях, установленных на плоту, находящемся на

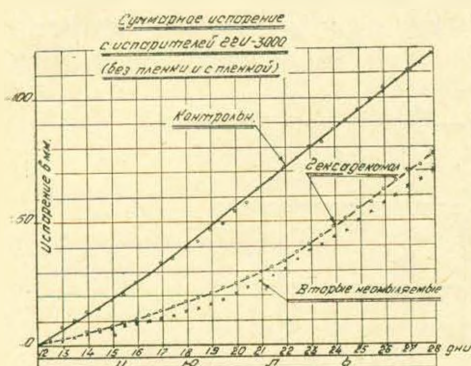


Рис. 7. Интегральные кривые испарения с поверхности испарителей (контрольного, покрытого пленкой гексадеканоля и покрытого пленкой спиртов из вторых неомыляемых).

Арданинском озере показали, что спирты из вторых неомыляемых по своему влиянию на процесс испарения с поверхности воды мало отличаются от импортного гексадеканоля (рис. 7). Приведенный рисунок соответствует условиям разовой подачи химиката по норме 1 г/м^2 . Химикаты были поданы 12 июля на испаритель ГИ-3000, установленный на плоту в Арданинском озере. Как видно из рисунка, абсолютная величина сокращения испарения, а также продолжительность эффекта для обоих химикатов совпадают. Эффективная жизнь монослоя длилась около 7

дней. За этот срок средняя величина уменьшения испарения составила в обоих случаях около 55%.

Надо отметить, что отечественный химикат, хотя отличается плохим запахом, имеет то преимущество, что он удобен в нанесении на поверхность воды, так как имеет жидкую консистенцию. Гексадеканоль же — порошкообразное вещество, из которого, перед нанесением его на поверхность водоема, необходимо создавать эмульсию.

Следующей задачей исследований в лабораторном бассейне являлось определение устойчивости пленки под действием ветра и волнения. Весьма важным условием применения является обеспечение возможно более высокой сохранности и сплошности пленочного покрытия на водной поверхности. Сохранность пленки, помимо обстоятельств химического и биологического характера, зависит от механических воздействий на нее, вызывающих разрывы пленки, например, под влиянием ветра, волнения и других обстоятельств (движение судов, атмосферные осадки и т. д.). В 1961 году были проведены опыты по установлению влияния ветра на сгон пленки. Различные поверхностно-активные вещества ведут себя в этом отношении по-разному. Поэтому представляют ценность некоторые сравнительные опыты, которые были проведены по изучению устойчивости пленок, создаваемых двумя различными веществами: гексадеканолем и спиртами из вторых неомыляемых. С этой целью аэрогендом создавался воздушный поток, вблизи поверхности которого (на высоте 1 см) скорости воздуха плавно менялись от 3,2 м/сек вблизи аэрогенда до 0,25 м/сек на расстоянии 26 м от последнего (рис. 8). После определения скоростного

поля над водной поверхностью опыты по сдуванию пленки ставились следующим образом. На поверхность бассейна по норме $0,02 \text{ г/м}^2$ подавался химикат. Как было отмечено выше он довольно быстро распространялся и за 30—40 минут покрывал всю поверхность бассейна. При работающем аэростенде в различных точках бассейна с помощью индикаторов определялось двухмерное² давление в пленке. В резуль-

Эпюры скоростей по оси бассейна

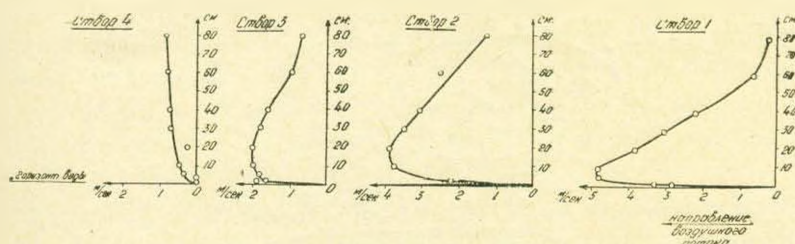


Рис. 8. Эпюры распределения скоростей воздушного потока в различных створах большого бассейна Норкской лаборатории.

тате выполнения этих опытов было установлено, что пленка теряла сплошность при скоростях воздушного потока порядка $1,5 \text{ м/сек}$ (этой скорости в натуре приблизительно соответствует скорость ветра порядка $3,5 \text{ м/сек}$ на высоте 2 м , на которой обычно производится измерение скоростей в естественной обстановке). После прекращения воздействия воздушным потоком (т. е. после остановки аэростенда) сплошность пленки в течение нескольких минут восстанавливалась и двухмерное давление достигало первоначальной величины.

После того как было установлено, что отечественный химикат

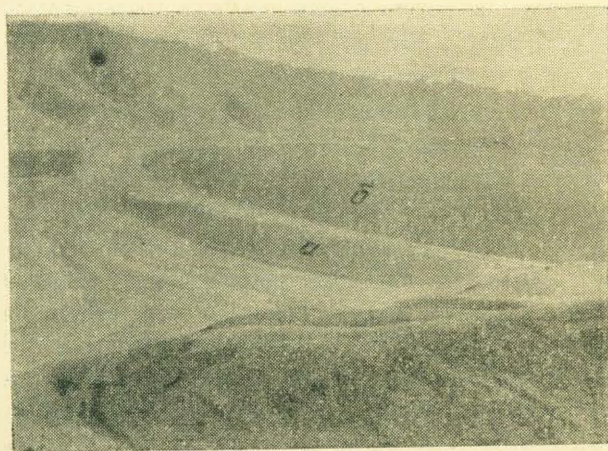


Рис. 9. Общий вид Арданишского озера (а) и части Арданишского залива оз. Севан (б).

дает в лабораторных условиях результаты мало отличающиеся от результатов, даваемых импортным химикатом, стало возможным перейти

к опытам с отечественным химикатом в природных условиях на Арданишском озере. Общий вид этого озера приведен на рис. 9 (а). Озера разделяются естественной дамбой, наименьшая ширина которой равна 200 м. На рис. 10 приведены основные характеристики и батиметрическая карта Арданишского озера. Площадь его зеркала составляет 40 га при длине 1200 м и наибольшей ширине 500 м. Максимальная глубина озера 3,8 м. Донные грунты озера по преимуществу представлены илами, только вблизи уреза южного и юго-западного берегов они по-

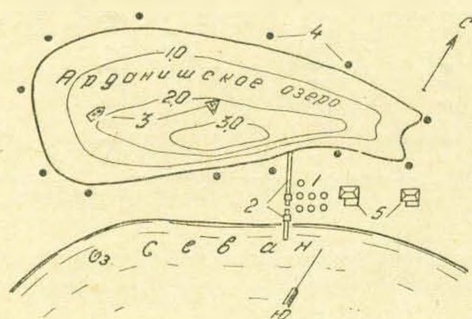


Рис. 10. Батиметрическая карта Арданишского озера и разрез по озеру; 1—испарительная площадка; 2—система насосной подкачки; 3—плоты с приборами; 4—колодцы-шурфы; 5—финские домики.

степенно переходят в уплотненные мелко-зернистые пески. Озеро зимой замерзает.

Помимо оснащения исследований различными приборами и оборудованием была создана насосная установка для перекачки воды из оз. Севан в Арданишское озеро с целью поддержания его уровня на высоких отметках. В противном случае это озеро осушилось бы, так как его уровень связан с непрерывно понижающимся уровнем оз. Севан. Ежесекундный расход воды, подаваемый насосами, составлял в среднем 50 л. Этим полностью компенсировались потери воды на испарение и фильтрацию, которая происходит в сторону оз. Севан. Перекачиваемый объем воды определялся с помощью двух треугольных водосливов, установленных в успокоительном баке, снабженном самописцем уровня „Валдай“. Комплекс гидрометрических и актиометрических наблюдений велся на плоту, установленном на якорь в озере в районе больших глубин (примерно на расстоянии 150 м от берега). Скорости ветра измерялись на плоту при помощи ручного анемометра на высоте 2 м над уровнем озера. На берегу был установлен анеморумбограф, который непрерывно записывал направление и скорость ветра на высоте 10 м. Температура воды у плота измерялась на глубинах 0,1 и 0,4 м, с помощью опрокидывающихся термометров. Термические съемки озера осуществлялись при помощи дистанционного электротермометра (ДЭТ), который был смонтирован на лодке. Психрометри-

ческие наблюдения велись на высоте 2 м при помощи аспирационного психрометра. Радиационный баланс озера устанавливался на основании данных наблюдений с помощью актинометрических приборов. Осадки на плоту измерялись осадкомером Третьякова (на высоте 2 м) и наземным дождемером при испарителе ГГИ-3000. Испарение на плоту измерялось с помощью испарителей ГГИ-3000, причем два из них с чистой водой являлись контрольными, а поверхность остальных двух покрывалась монослоем, создаваемым спиртами из вторых неомыляемых.

На берегу озера на водно-испарительной площадке были организованы синхронные наблюдения за гидрометеорологическими элементами. На 26 береговых испарителях велись в четыре срока наблюдения за испарением с поверхности воды, покрытой различными поверхностноактивными веществами.

На берегу озера по его периметру было заложено 12 колодцев-шурфов, в которых велись наблюдения за колебаниями уровня грунтовых вод. Эти наблюдения были начаты в июне и продолжались до ноября. Затем они были продолжены после того, как поверхность озера полностью покрылась льдом. Толщина последнего достигала 25 см.

Уровни воды во всех колодцах во все время наблюдений были ниже уровня Арданишского озера. Это позволило сделать вывод, что подземного притока воды в озеро не было. Метод, который был использован для определения испарения с поверхности озера не покрытого монослоем и покрытого им, основан на данных наблюдений на пловучих испарителях.

В общем виде выражение для испарения с поверхности испарителя или озера может быть записано в виде следующей эмпирической зависимости, которая хорошо согласуется с данными наблюдений на оз. Севан [6, 7];

$$E = a(b + v)(e_0 - e_2), \quad (1)$$

где v — скорость ветра на высоте 2 м; e_0 — максимальная упругость водяных паров, рассчитываемая по температуре поверхности воды; e_2 — влажность воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью; a и b коэффициенты (по данным наблюдений на пловучих испарителях, $a=0,075$ и $b=4,54$).

В формуле (1) все входящие в нее элементы имеют одни и те же значения как для испарителя, так и для озера, за исключением e_0 , что обусловлено различием в температурах поверхности воды в испарителе и озере. После соответствующей корректировки значения e_0 получаем величину испарения с поверхности озера.

Уравнение водного баланса озера имеет следующий вид:

$$h_{\phi} + h_{\text{н}} - h_{\text{ос}} - h_{\text{под}} = \pm \Delta h, \quad (2)$$

где члены, входящие в левую часть уравнения представляют из себя изменения отметки озера, вызванные соответственно фильтрацией, испарением, осадками, подкачкой воды, а Δh — наблюдаемые результирующие изменения отметки воды озера. Из уравнения (2) определяется неизвестная величина h_{ϕ} .

Результаты расчетов испарения с поверхности Арданишского озера без пленки и с пленкой представлены в виде интегральных кривых на рис. 11, (результаты исследований 1962 г.), где на вертикальной

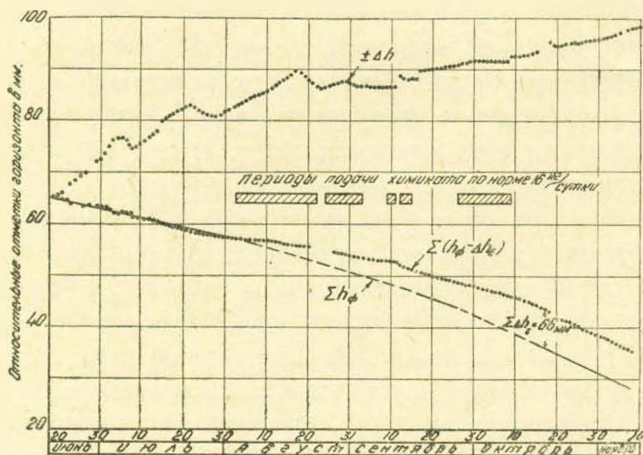


Рис. 11. График к расчету испарения с поверхности Арданишского озера.

оси отложены отметки уровня воды в озере, а на горизонтальной оси — время в сутках. На рисунке показаны наблюдаемые отметки воды озера $\pm \Delta h$, сумма значений фильтрации Σh_{ϕ} , $\Sigma(h_{\phi} - \Delta h_E)$ рассчитанные описанным выше способом и величина $\Sigma \Delta h_E$. С 3 августа по 13 октября суммарное уменьшение испарения, достигнутое благодаря наличию пленки составило 66 мм, т. е. 19,5% от естественного испарения за тот же период. В 1961 г. за 12 суток уменьшение испарения составило 14%.

Предварительные опыты показали, что скорость „дрейфа“ пленки примерно в 20—25 раз меньше скорости ветра, измеренной на высоте 2 м.

При изменении направления ветра, соответствующим образом перемещается и пленка. Арданишское озеро находится в сравнительно тяжелых условиях. Здесь ветры имеют значительную силу и дуют по преимуществу в одном направлении. Поэтому пленка долгое время не может оставаться на поверхности озера. Этим и объясняется то, что процент сокращения испарения получается сравнительно небольшим.

Предварительные экономические подсчеты показали, что при средней величине сокращения испарения в размере 14%, в результате применения спиртов из вторых неомыляемых в условиях Арданишско-

го озера и при суточной норме подачи химиката в размере $0,04 \text{ г/м}^2$, стоимость одного кубометра сохраненной воды составляет около 3 коп. при стоимости кг химиката 50 к.*.

В связи с поисками более перспективных с экономической точки зрения поверхностноактивных веществ, чем спирты из вторых неомыляемых, Институтом физической химии АН СССР (лаборатория олеоколлоидов и монослоев) были синтезированы новые вещества. Некоторые из них дали в лабораторных условиях хорошие результаты, что было подтверждено и опытами, проведенными в лаборатории Института органической химии АН Армянской ССР (руков. Т. В. Крмоян). Эти новые химикаты были переданы ИВП для постановки опытов в Норкской лаборатории в условиях близких к натурным. Результаты экспериментов будут опубликованы отдельно.

С 1961 г. по проблеме применения поверхностноактивных веществ для покрытия водоемов работает также Севанская гидробиологическая станция АН Армянской ССР, которая занимается вопросами влияния указанных веществ на флору и фауну Арданишского озера.

Поступило 25.1.63.

Ա. Կ. ԱՆԱՆՅԱՆ, Բ. Ի. ԲՆԻՄԱՐՄԱՐՁԵՎ,
Վ. Ն. ԺԱՄԱԳՈՐԾՅԱՆ, Ա. Մ. ՄԵԼԻՍՅԱՆ

ՀԱՅՐԵՆԱԿԱՆ ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԱՅԻՆ ԱԿՏԻՎ ՆՅՈՒԹԵՐԻ
ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՓՈՐՁԸ ԶՐԱՄԲԱՐԻ ՄԱԿԵՐԵՍԻՑ ԴՈՒՈՐՇԻԱՅՈՒՄԸ
ԿՐՃԱՏՅԵԼՈՒ ՀԱՄԱՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգիւածում բերվում են 1961—1962 թթ. լաբորատոր, դաշտային և բնական պայմաններում կատարված փորձերի արդյունքները, որոնք նպատակ են ունեցել գոլորշիացման կրճատման միջոցով ավելացնել ջրամբարներում օդադործման համար կուտակվող ջրային պաշարները:

Լաբորատոր հետազոտությունները կատարվել են ինստիտուտի բաց հիդրավլիկական լաբորատորիայում կառուցված հատուկ ջրամբարում (պծ. 1, 2), որն ունի 650 ք.մ մակերես: Վերջինիս մի ծայրում տեղադրված է հատուկ ալիք առաջացնող հարմարանք, մյուս ծայրում՝ աէրոդինամիկական ստենդ՝ տարբեր բարձրությունների ալիքներ և տարբեր արագությունների օդային հոսանքներ առաջացնելու համար: Տեղադրված են նաև ջրային գոլորշիացնողներ տարբեր մակերեսներով և խորություններով:

Դաշտային հետազոտությունները կատարվել են Սևանա լճի ափին գտնվող Արտանիշի հատուկ փորձնական բազայում՝ ջրա-գոլորշիացման հրա-

* В дальнейшем стоимость химиката будет снижена.

պարակում, որակի տեղադրված են բաղմամբիվ գոլորշիացնողներ 0,3-ից մինչև 20 ք.մ մակերեսով և 0,6-ից մինչև 4 մ խորությամբ:

Բնական հետազոտությունները կատարվել են Արտանիշի ծովածոցում Սևանա լճի իջնելուց հետո մնացած լճակի վրա, որի մակերեսը հասնում է 40 հեկտարի և խորությունը 4 մ-ի:

Հետազոտությունների արդյունքները ցույց են տվել, որ.

1. Գոլորշիացման կրճատումը երկրորդային չօճառացվող սպիրտից ստացվող միամոլեկուլյար թաղանթի միջոցով ամուսն առաջին կեսերին հասնում է $40-50\%$ -ի: Ամուսն վերջին և աշնան սկզբին, երբ օդի (և ջրի) ջերմաստիճանն իջնում է, կրճատման աստիճանը նույնպես նվազում է, մինչև $30-35\%$ -ի:

Բնական պայմաններում կատարված փորձերը ցույց են տալիս, որ լճակի մակերևույթից գոլորշիացման կրճատումը հասնում է $14-15\%$ -ի:

2. Նախնական տնտեսական հաշվարկները ցույց են տալիս, որ եթե գոլորշիացման կրճատման միջին մեծությունը 14% է, ապա երկրորդական չօճառացվող սպիրտների կիրառման դեպքում, երբ նյութի օրական ծախսը կազմում է $0,04 \text{ գ/մ}^2$, տնտեսվող ջրի 1 մ³-ն արժե 3 կոպեկ, աճն դեպքում, երբ նյութի 1 կգ արժե 50 կոպեկ: ՍՍՍՐ-ի ԳԱ Օրդանական քիմիայի ինստիտուտի տվյալների համաձայն տպագրված քիմիական նյութի արժեքը կիջնի:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Егизаров И. В. Возможность значительной экономии водных ресурсов для народного хозяйства и мономолекулярная защитная пленка для борьбы с испарением с поверхностей озер и водохранилищ. Сообщение 1. Известия АН Армянской ССР, ОТН, т. XII, № 3, 1960; сообщение 2. Там же, т. XII, № 6, 1960; сообщение 3. Там же, т. XIV, № 2, 1961.
2. Егизаров И. В. Водные ресурсы и борьба с испарением воды с поверхности малых и больших водоемов. Известия АН Армянской ССР, ОТН, т. XV, № 4, 1962.
3. Макарова В. С. и Мхитарян А. М. Опыты по применению мономолекулярной пленки в целях сокращения испарения, проведенные на берегу оз. Севан. Известия АН Армянской ССР, ОТН, т. XIV, № 3, Ереван. 1961.
4. Трапезников А. А., Огарев В. А. Монослой спиртов для снижения испарения с водной поверхности и прибор для измерения двухмерного давления монослоев. Труды ГГИ, вып. 91, Метеоиздат, Л. 1961.
5. Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. т. 1, изд. АН Армянской ССР. Ереван 1961.
6. Зайков Б. Д. Очерки по озероведению, Гидрометеоиздат, Л., 1955.

ГИДРОТЕХНИКА

В. М. БАРСЕГЯН, В. Н. ЖАМАГОРЦЯН

ПРИБОР ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДАЧИ ХИМИКАТА
СОЗДАЮЩЕГО ПЛЕНКУ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
ПРЕПЯТСТВУЮЩУЮ ИСПАРЕНИЮ

Применению мономолекулярной пленки для уменьшения испарения посвящены работы [1, 2]. Особое место уделяется вопросу о способе подачи химиката на водную поверхность, от чего отчасти зависит получаемый эффект. Задача заключается в том, чтобы покрыть пленкой возможно большую площадь водоема. Естественно ожидать, что способность покрытия будет достигнута, если сдуваемая ветром пленка будет восстанавливаться и притом автоматически в зависимости от направления и силы ветра. В этом направлении в иностранной литературе сделаны попытки [3, 4]. Однако описания приборов не дают полного представления об их конструктивных особенностях. В ИВП был сконструирован прибор, пригодность которого проверялась при опытах по борьбе с испарением на Арданишском озере. По предварительным данным, полученным в результате кратковременной эксплуатации, прибор соответствовал своему назначению при температурах воды выше $15-16^{\circ}$, когда примененное поверхностно-активное вещество (спирты из вторых неомыляемых) имело жидкую консистенцию.

При конструировании прибора были поставлены следующие требования:

1. Прибор должен приводиться в действие силой ветра;
2. Количество подаваемого химиката должно быть пропорционально скорости ветра;
3. Прибор должен работать только при ветрах, направление которых меняется в пределах заданных румбов;
4. Зарядка прибора производится не чаще одного раза в сутки;
5. Расстояние между смежными автоматами должно быть таким, чтобы создаваемые ими пленочные ковры смыкались, обеспечивая тем самым сплошность покрытия;
6. Конструкция прибора должна допускать регулирование нормы подаваемого химиката;
7. Прибор должен быть пригоден для работы на открытом воздухе и иметь простую конструкцию.

Описываемый автомат состоит из металлического цилиндра наполняемого химикатом, который во время работы выталкивается опущенным в воду...

9. ТН, № 2—3.

скающим поршнем. Движение поршня связано с вращением вертушки по типу анемометра.

В зависимости от скорости ветра меняется подача количества химиката. Это количество в свою очередь зависит от расстояния между приборами S и от нормы химиката n . Под нормой химиката здесь подразумевается то минимальное его количество, которое при отсутствии ветра необходимо для покрытия пленкой 1 м^2 водной поверхности для получения оптимальной величины сокращения испарения. Норма химиката измеряется в $\text{г}/\text{м}^2$.

Предположим, что ветер, движущийся со скоростью $V \text{ м/сек}$, в течение t секунд отогнал пленку от берега на расстояние $l \text{ м}$. Тогда, для поддержания сплошности пленки необходимо, чтобы каждый автомат подавал следующее количество химиката:

$$q = \frac{ns}{1000} l. \quad (1)$$

Но

$$l = V_1 t,$$

где $V_1 = \beta V$ — скорость дрейфа пленки под воздействием ветра, принимая пропорциональной скорости ветра. Попутно отметим, что согласно опытным данным полученным на Арданишском озере, где применялись спирты из вторых неомыляемых, коэффициент β при $V=4-5 \text{ м/с}$ оказался равным $0,05$. В силу указанного принимая $t=1 \text{ сек}$. из выражения (1) получим

$$q = \frac{ns \beta V}{1000} \text{ кг}^2/\text{сек}. \quad (2)$$

С другой стороны

$$q = Z \omega \gamma, \quad (3)$$

где Z — перемещение поршня в цилиндре за одну секунду,

ω — площадь сечения цилиндра,

γ — объемный вес химиката.

Приравнявая выражения (2) и (3) получим

$$Z = \frac{ns \beta V}{1000 \omega \gamma}. \quad (4)$$

Количество химиката подаваемого автоматом пропорционально числу оборотов вертушки. Это число оборотов почти прямо пропорционально скорости ветра и может быть выражено через

$$Z = M V,$$

где

$$M = \frac{ns \beta}{1000 \omega \gamma}. \quad (5)$$

Размеры вертушки подбираются в зависимости от требуемого значения коэффициента M . Для Арданишских исследований, где расстояние между приборами было выбрано из условия указанного в

պետք է լինի V-ին: Որպեսզի T ժամանակում անհրաժեշտ լինի միայն մեկ անգամ գլանը քիմիանյութով լցնել, նրա պահանջվող W ծավալը կարողանալով (8) բանաձևով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Егиазаров И. В. Возможность значительной экономии водных ресурсов для народного хозяйства и мономолекулярная защитная пленка для борьбы с испарением поверхности водоемов, озер и водохранилищ. „Известия АН Армянской ССР“, серия ТН, т. XIII, № 3, 1960.
2. Ананян А. К., Бек-Мармарчев Б. И., Жамагорцян В. Н., Мхитарян А. М. „Известия АН Армянской ССР, серия ТН, т. XVI, № 2—3, 1963.
3. Q. L. Florty, L. O. Timblin, Jr. and G. E. Kobery. Evaporation suppression studies on Sahuaro lake, Arisona ASCE. April, 1961.
4. Crow F. R. Reduction of reservoir evaporation losses by the application of surface film of hexadecanol. ASAE, 1960.

ГИДРОТЕХНИКА

Л. А. ДАЯН

ДВИЖЕНИЕ МОНОМОЛЕКУЛЯРНОЙ ПЛЕНКИ ПОД ВЛИЯНИЕМ
РАВНОМЕРНОГО ВЕТРА

В последнее время с целью сокращения испарения с водной поверхности используют жирные спирты, молекулы которых, сцепляясь с молекулами воды образуют тонкий, мономолекулярный слой уменьшающий испарение [1]. Эффективность этой пленки связана с явлениями волнения водной поверхности и ветрового дрейфа пленки. В статье исследуется дрейф мономолекулярной пленки под влиянием равномерного ветра. Поверхность водоема покрыта мономолекулярной пленкой. Под влиянием равномерного ветра пленка движется. Нас интересуют скорость и направление движения пленки.

Рассматриваем трехслойную задачу: воздух, пленка, вода. Напишем уравнение движения отдельно [2]:

для воздуха

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \right) + l v_1,$$
$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_1 \frac{\partial v_1}{\partial z} \right) - l u_1;$$

для воды

$$0 = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_2 \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) + l v_2,$$
$$0 = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_2 \frac{\partial v_2}{\partial z} \right) - l u_2;$$

для пленки

$$0 = k_1 \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=0} + k_2 \rho_2 \frac{\partial u_2}{\partial z} \Big|_{z=0} + l v_0,$$
$$0 = k_1 \rho_1 \frac{\partial v_1}{\partial z} \Big|_{z=0} + k_2 \rho_2 \frac{\partial v_2}{\partial z} \Big|_{z=0} - l u_0.$$

Здесь $u_1, v_1, u_2, v_2, u_0, v_0$ — соответственно горизонтальные составляющие скорости ветра, воды и пленки, ρ_1 и ρ_2 — плотности воздуха и воды, p — давление, $l = 2 \omega \cos \theta$ — параметр Кориолиса. Начало координат расположено на поверхности; при этом вертикальные оси z и ζ направлены соответственно вверх и вниз.

Из приведенных шести уравнений можно получить следующие три уравнения, соответственно для воздуха, воды и пленки:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k_1 \frac{\partial V_1}{\partial z} \right) - il V_1 + il G = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \left(k_2 \frac{\partial V_2}{\partial \zeta} \right) - il V_2 = 0; \quad (2)$$

$$il V_0 = k_1 \rho_1 \frac{\partial V_1}{\partial z} \Big|_{z=0} + k_2 \rho_2 \frac{\partial V_2}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0}; \quad (3)$$

$$G = G_x + i G_y,$$

где $V_i = u_i + i v_i$ — комплексная скорость

$$G_x = - \frac{1}{\rho l} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad G_y = \frac{1}{\rho l} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{— градиентный ветер.}$$

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{при } z=0 \text{ и } \zeta=0, \quad V_1 = V_2 = V_0; \\ \text{при } z \rightarrow \infty, \quad V_1 = G; \\ \text{при } \zeta \rightarrow \infty, \quad V_2 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае, когда коэффициенты турбулентной вязкости $k_1 = \text{const}$, $k_2 = \text{const}$, уравнение (1) и (2) принимают вид:

$$k_1 \frac{\partial^2 V_1}{\partial z^2} - il V_1 + il G = 0, \quad (5)$$

$$k_2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial \zeta^2} - il V_2 = 0. \quad (6)$$

Решение этих уравнений при граничных условиях (4) имеют следующий вид:

$$V_1 = G \{ 1 - \exp [- a (1+i) z] \} + V_0 \exp [- a (1+i) z]; \quad (7)$$

$$V_2 = V_0 \exp [- a_2 (1+i) \zeta], \quad (8)$$

$$\text{где } a_1 = \sqrt{\frac{\omega \cos \theta}{k_1}}, \quad a_2 = \sqrt{\frac{\omega \cos \theta}{k_2}}.$$

Подставляя значения V_1 и V_2 в уравнение (3), в силу (4) находим значения компонентов скорости пленки:

$$u_0 = G_x \frac{k_1 \rho_1 a_1 l}{A^2 + B^2} - G_y \frac{k_1 \rho_1 a_1 l}{A^2 + B^2}; \quad (9)$$

$$v_0 = G_x \frac{k_1 \rho_1 a_1 l}{A^2 + B^2} - G_y \frac{2k_1^2 \rho_1^2 a_1^2 + 2k_1 \rho_1 a_1 k_2 \rho_2 a_2 + k_1 \rho_1 a_1 l}{A^2 + B^2}, \quad (10)$$

$$\text{где } A = k_1 \rho_1 a_1 + k_2 \rho_2 a_2, \quad B = l + k_1 \rho_1 a_1 + k_2 \rho_2 a_2.$$

Формулы (9) и (10) показывают, что скорость пленки пропорциональна скорости градиентного ветра. Направление дрейфа (угол между направлением движения пленки и осью x) будет:

$$\text{tg} \alpha = \frac{G_x l - G_y l}{G_x l - G_y (A+B)}. \quad (11)$$

Под влиянием силы Кориолиса направление движения пленки отклоняется от направления ветра.

В действительности коэффициенты турбулентности не являются постоянными величинами, а зависят от вертикальной координаты. Для коэффициента турбулентной вязкости в воздухе пользуемся моделью излома Юдина и Швеца:

$$k_1 = \begin{cases} c_1 z & z \leq h, \\ c_1 h & z > h. \end{cases} \quad (12)$$

Формула (12) дает линейное возрастание коэффициента турбулентной вязкости до некоторой высоты h , после чего он остается постоянным (рис. 1).

Для коэффициента турбулентной вязкости в воде пользуемся формулой вида:

$$k_2 = \begin{cases} \bar{k}_2 - a_0 \bar{\zeta} & \bar{\zeta} \leq h_1, \\ k_0 & \bar{\zeta} > h_1, \end{cases} \quad (13)$$

где
$$a_0 = \frac{\bar{k}_2 - k_0}{k_0}, \quad \bar{\zeta} = \frac{\zeta}{h}.$$

Формула (13) дает линейное убывание коэффициента турбулентной вязкости до некоторой глубины h_1 , после чего этот коэффициент совпадает с коэффициентом молекулярной вязкости k_0 . $\bar{k}_2$ — коэффициент турбулентной вязкости на поверхности воды (рис. 2).

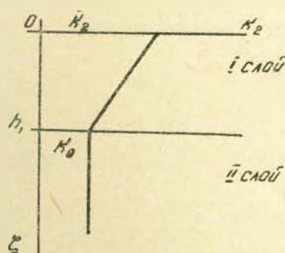


Рис. 2. Изменение коэффициента турбулентной вязкости с глубиной в воде.

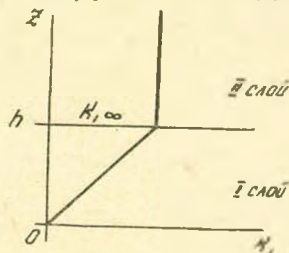


Рис. 1. Изменение коэффициента турбулентной вязкости с высотой в атмосфере.

Перейдем к решению уравнения движения отдельно для воздуха и воды.

Напишем уравнение движения для воздуха отдельно для I и II слоев.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial V_1}{\partial z} \right) - \frac{il}{c_1} V_1 + \frac{il}{c_1} G = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 V_1}{\partial z^2} - \frac{il}{c_1 h} V_1 + \frac{il}{c_1 h} G = 0. \quad (15)$$

Граничные условия имеют вид:

$$\text{при } z = z_0, \quad V_1^I = V_0;$$

$$\text{при } z = h, \quad V_1^I = V_1^{II}, \quad \frac{\partial V_1^I}{\partial z} = \frac{\partial V_1^{II}}{\partial z}; \quad (16)$$

$$\text{при } z \rightarrow \infty, \quad V_1^{II} = G.$$

Решение уравнения (24) будем искать в виде суммы общего однородного и частного решений неоднородного уравнения. Частное решение неоднородного уравнения можно взять в виде: $V_1 = -G$.

Однородное уравнение

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial V_1}{\partial z} \right) - \frac{il}{c_1} V_1 = 0 \quad (17)$$

после замены переменной $y = 2 \sqrt{\frac{\omega \cos \theta}{c}} zi = z' \sqrt{i}$ приводит к уравнению Бесселя

$$\frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial V_1}{\partial y} \right) + V_1 = 0. \quad (18)$$

Решением уравнения (18) является:

$$V_1 = \bar{c}_1 I_0(y) + \bar{c}_2 H_0(y),$$

где I_0 и H_0 — функции Бесселя и Ханкеля нулевого порядка от комплексного аргумента.

Окончательное решение уравнения (14) имеет вид:

$$V_1^1 = \bar{c}_1 J_0(z' \sqrt{i}) + \bar{c}_2 H_0(z' \sqrt{i}) - G. \quad (19)$$

Решая уравнение (15) получим:

$$V_1^{11} = G \{1 - \exp[-a(1+i)z]\} + c \exp[-a(1+i)z]. \quad (20)$$

В силу (16) находятся постоянные интегрирования $\bar{c}_1$ и $\bar{c}_2$.

Окончательно скорость ветра в приводном слое будет равна:

$$V_1 = \frac{(V_0 + G)b - 2GH_0(z_0' \sqrt{i})}{A_1} J_0(z' \sqrt{i}) + \\ + \frac{2GJ_0(z_0' \sqrt{i}) + (V_0 + G)a}{A_1} H_0(z' \sqrt{i}) - G. \quad (21)$$

Движение воды для двух слоев описывается уравнениями:

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \left[(\bar{k}_2 - a_0 \zeta) \frac{\partial V_2}{\partial \zeta} \right] - \frac{il}{\bar{k}_2} V_2 = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 V_2}{\partial \zeta^2} - \frac{il}{k_0} V_2 = 0. \quad (23)$$

Граничные условия имеют следующий вид:

$$\text{при } \zeta = \zeta_0, \quad V_2^{(1)} = V_0;$$

$$\text{при } \zeta = h_1, \quad V_2^{(1)} = V_2^{(11)}, \quad \frac{\partial V_2^{(1)}}{\partial \zeta} = \frac{\partial V_2^{(11)}}{\partial \zeta}; \quad (24)$$

$$\text{при } \zeta \rightarrow \infty, \quad V_2^{(11)} = 0,$$

где ζ_0 — высота шероховатости.

Уравнение (22) заменой переменной $x = 1 - a_0 \frac{\zeta}{h_1}$ приводит к уравнению Бесселя

$$\frac{d^2 V_2}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dV_2}{dx} + \frac{il h_1^2}{k_2 a_0^2} \cdot \frac{1}{x} V_2 = 0,$$

решение которого имеет следующий вид:

$$V_2^{(1)} = \tilde{c}_1 J_0(\beta \sqrt{ix}) + \tilde{c}_2 H_0(\beta \sqrt{ix}), \quad (25)$$

где $\beta = \frac{2h}{a_0} \sqrt{\frac{l}{k^2}}$. J_0 и H_0 — функции Бесселя и Ханкеля от комплексного аргумента.

Решение для второго слоя воды имеет вид:

$$V_2^{(II)} = \bar{c}_3 \exp[-b_0(1+i)\zeta], \text{ где } b_0 = \sqrt{\frac{l}{2k_0}}.$$

С помощью граничных условий (24) определяются постоянные интегрирования $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3$. Окончательно для скорости воды в поверхностном слое получаем:

$$V_2 = \frac{A_1 H_0(\beta \sqrt{ix}) - B_1 J_0(\beta \sqrt{ix})}{\Delta} V_0,$$

где

$$A_1 = J_0(\beta \sqrt{ix_h}) + J_1(\beta \sqrt{ix_h}),$$

$$B_1 = H_0(\beta \sqrt{ix_h}) + H_1(\beta \sqrt{ix_h}),$$

$$\Delta = J_0(\beta \sqrt{ix_0}) B_1 - H_0(\beta \sqrt{ix_0}) A_1,$$

$$x_0 = 1 - a_0 \frac{\zeta_0}{h_1}, \quad x_h = 1 - a_0.$$

Теперь уже зная скорости ветра и воды в поверхностных слоях, на основании (3) можно найти скорость движения пленки по формуле:

$$\text{и } V_0 = c_1 \rho_1 \left. \frac{dV_1}{dz} \right|_{z=z_0} + (\bar{k}_2 - a_0 \bar{\zeta}) \rho_2 \left. \frac{dV_2}{d\zeta} \right|_{\zeta=\zeta_0}.$$

Подставляя полученные значения V_1 и V_2 в это уравнение, определяем компоненты скорости движения пленки

$$u_0 = -\frac{2\sqrt{2}z_0^0 l}{S^2 + L^2} [G_x (MS + LN) - G_y (NS - ML)]; \quad (27)$$

$$v_0 = -\frac{2\sqrt{2}z_0^0 l}{S^2 + L^2} [G_x (NS - ML) + G_y (MS + LN)],$$

где M, N, S, L — постоянные величины.

Полученное выражение показывает, что скорость движения пленки пропорциональна скорости градиентного ветра, а направление движения пленки, выражаемое формулой $\text{tg} \alpha_0 = v_0/u_0$, не совпадает с направлением ветра — $\text{tg} \alpha_1 = v_1/u_1$.

В частности для параметров атмосферы

$$\rho_1 = 1,03 \cdot 10^3 \text{ г/м}^3; \quad h = 50 \text{ м.} \quad c_1 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м/сек.}$$

$$z_0 = 10^{-4} \text{ м}, \quad \zeta_0^1 = 10^{-3},$$

и для параметров воды

$$\rho_2 = 1 \cdot 10^6 \text{ г/м}^3, \quad \zeta_0 = 10^{-4} \text{ м}, \quad k_2 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек.}$$

$$k_0 = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}, \quad h_1 = 20 \text{ м} \quad \text{и} \quad l = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м/сек.}$$

По формуле (21) находим величину скорости ветра $v_1 = 14,7$ м/сек, на высоте 1 м над водной поверхностью, а по формуле (27) — скорость движения пленки $v_0 = 0,45$ м/сек.

Наблюдения в натуре показали, что отношение скорости ветра к скорости пленки равно примерно 20. В рассмотренном нами примере это отношение равно 32. Причина расхождения возможно заключается в том, что уравнения движения атмосферы упрощены и многие факторы, которые могут образовать ветер, не учтены. Например, движение ветра принимается равномерным, что для озера Севан маловероятно; не учтены окружающие озеро горы, которые создают разность температуры и т. д. При решении задачи не учитывались также физико-химические характеристики мономолекулярной пленки.

Поступило 15.I 1963 г.

Լ. Ա. ԴԱՅԱՆ

ՄՈՆԻՏՈՐԻՆԳԱՐ ԹԱԼԱՆԹԻ ՇԱՐԺՈՒՄԸ ՀԱՎԱՍԱՐԱԶԱՓ ՔՍՄՈՆ ԱԶԳԵՅՈՒԹՅԱՆ ՏԱԿ

Ա մ փ ո փ ու մ

Աշխատանքում տեսականորեն ուսումնասիրվում է մոնիթորինգային թաղանթի շարժումը՝ հավասարաչափ փչող քամու ազդեցության տակ:

Ինչպես հայտնի է, վերջին տարիներս ջրի մակերևույթից գոլորշիացումը կրճատելու համար օգտագործում են յուզային սպիրտներ, որոնք ջրի մակերևույթի վրա առաջացնում են մոնիթորինգային թաղանթ: Այդ սպիրտների օգտագործման էֆեկտիվությունը կախված է նրա առաջացրած թաղանթի շարժման հետ:

Թաղանթը շարժվում է քամու ազդեցության տակ, ջրի հետ միասին: Աշխատանքում դիտվում է եռշերտ խնդիր—օդ, թաղանթ, ջուր: Օդի և ջրի շարժման արագությունների միջոցով որոշվում է թաղանթի շարժման արագությունը և ուղղությունը. ստացված բանաձևերով հաշվված է կոնկրետ օրինակ, ընդ որում խնդրի պարամետրերը վերցրած են Սևանա լճի համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Егизаров И. В. Возможность значительной экономии водных ресурсов для народного хозяйства и мономолекулярная пленка для борьбы с испарением с поверхности водоемов, озер и волохранилищ, „Известия АН Армянской ССР“, сер. ТН, № 3 и 6, 1960, № 2, 1961, и № 4, 1962.
2. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы, Гидроиздат, 1961.

Իվան Վասիլի Եղիազարով	3
Հիդրոէներգետիկական և հիդրավիկական հետազոտութիւնների վարդապետ Վ. Մ. Մանուկյան ՍՍԽ-ում և Զբոս-էներգետիկ ինստիտուտի և Զբոյին պրոբլեմների ինստիտուտի պատմութիւնը	15

Հիդրավիկա

Ի. Վ. Եղիազարով. Մեծութեամբ անհամասեռ ջրաբերուկների խառնուրդի շարժումը	41
Վ. Գ. Սանոյան. Սեղգաձիկ խողովակում մանր կախված մասնիկների շարժման հարցի շուրջը	51
Ե. Տ. Զրբաշյան. Տուրբուլենտ հոսանքում կոշտ մասնիկների հարաբերական արագութեան մասին	59
Ի. Գ. Քրիստոստուրյան. Աղտոտ մակերեսային և տրադուկտների դաշտի ստացումը հաստատված շարժման ժամանակ, ջրատարի լայնացող մասում, անալիտիկորեն	69
Ե. Տ. Զրբաշյան, Դ. Մ. Հովնանիսյան. Զրաբերուկներ տարող հոսանքի ընդերկայնական արագութեան բաշխման կորերի մասին	77

Հիդրոլոգիա

Ն. Ա. Քարթվեիշվիլի. Գետային հոսքի մի քանի հաժանակային բնութագրերը	83
---	----

Հնեագետիկա

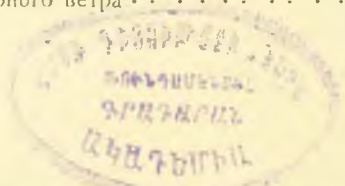
Կ. Խ. Հովսեփյան. Հիդրոագրեգատի տատանումների հաշվումը նրա բեռնավորման և բեռնաթափման ղեկավարում	95
Բ. Լ. Բուրկարյան. Ծնշման կորուստները անսեղմելի հեղուկների չհաստատված շարժման ղեկավարում	101
Ն. Ա. Իսախանյան. Հիդրոագրեգատի կարգավորման դինամիկ կայունութեան բավարար պայմանների մասին	109

Հիդրոսեյսմիկա

Ա. Կ. Անանյան, Բ. Ի. Բեկ-Մարմարչև, Վ. Ն. Ժամագործյան, Ա. Մ. Մխիթարյան. Հայրենական արտագրութեան մակերեսային ալիքային շարժումների կիրառման փորձը ջրամբարի մակերեսից գոլորշիացումը կրճատելու համար	117
Վ. Մ. Բախսեյյան, Վ. Ն. Ժամագործյան. Զբոյին մակերեսի վրա գոլորշիացման փոքրացման համար թաղանթ առաջացնող քիմիանյութի ափսոսաբար սարք	129
Լ. Ա. Դալյան. Մոնոմորֆիկությամբ թաղանթի շարժումը հալմասարաչափ քամու ազդեցութեան տակ	133

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<i>Иван Васильевич Егиазаров</i>	3
Развитие гидроэнергетических и гидравлических исследований в Армянской ССР и история Водно-энергетического института и Института водных проблем	15
Гидравлика	
<i>И. В. Егиазаров</i> . Движение неоднородной по крупности смеси наносов .	41
<i>В. Г. Саноян</i> . О взвешивании мелких частиц в вертикальной трубе . .	51
<i>Э. Т. Джрбашян</i> . Об относительной скорости движения твердых частиц в турбулентном потоке	59
<i>И. Г. Крестостурян</i> . Аналитическое определение вида свободной поверхности и поля скоростей в расширяющемся участке канала при установившемся течении	69
<i>Э. Т. Джрбашян, Д. М. Оганесян</i> . О кривых распределения продольных скоростей компонентов взвешенного потока	77
Гидрология	
<i>Н. А. Картвелишвили</i> . Некоторые вероятностные характеристики речного стока	83
Энергетика	
<i>К. Х. Овсепян</i> . О расчете качаний гидроагрегата при сбросах и набросах нагрузки	95
<i>Б. Л. Буниatian</i> . О потерях напора при неустановившемся движении несжимаемой жидкости	101
<i>Н. К. Иоаннисян</i> . О достаточных условиях динамической устойчивости регулирования гидроагрегата	109
Гидротехника	
<i>А. К. Ананян, Б. Н. Бек-Мармарчев, В. Н. Жамагорцян, А. М. Мхитарян</i> . Опыт применения поверхностно активных веществ отечественного производства для уменьшения испарения с поверхности воды в водоемах	117
<i>В. М. Барсегян, В. Н. Жамагорцян</i> . Прибор для автоматической подачи химиката создающего пленку на водной поверхности, препятствующую испарению	129
<i>Л. А. Даян</i> . Движение мономолекулярной пленки под влиянием равномерного ветра	133



Сдано в производство 20/III 1963 г. Подписано к печати 7/V 1963 г.

БФ 07090. Заказ 120. Изд. 2292. Тираж 700. 8,75 п. л.

Типография Издательства АН Армянской ССР, Ереван, ул. Барекамутян 24.