

Н. И. Долуханова

К вопросу о классификации природных вод и графическом изображении их состава

Различные предложения систематизации и графического выражения анализов воды многочисленны и свидетельствуют о необходимости таких наглядных изображений. Нами предлагается метод систематизации химических анализов, в основание которого положено соотношение между главными шестью компонентами химического состава вод.

Известно, что соотношение компонентов является характерным признаком различных типов воды.

Разбивка вод дается отдельно по катионному и по анионному составу, причем выделяется по 6-ти классов (I—VI для катионного состава и А—F для анионного состава). Комбинацией их образуется 36 классов или 108 подклассов.

За основу взят следующий порядок компонентов: 1) для катионов Na, Ca, Mg, 2) для анионов HCO_3 , Cl, SO_4 . Значение их берется в милливаль-процентах. Классы определяются преобладающим компонентом. Так, в I и II классы выделены воды с преобладанием Na над остальными компонентами, но в I классе за Na по величине процентного содержания следует Ca, тогда как во II за Na следует Mg. В III и IV классы выделены воды с преобладанием Ca над остальными компонентами. В III классе за Ca по величине процентного содержания следует Na, а в IV классе Mg. В V и VI классы выделены воды с преобладанием Mg над остальными компонентами. В V классе за Mg по величине процентного содержания следует Na, а в VI классе—Ca.

В классы „А“ и „В“ выделены воды с преобладанием HCO_3 над остальными компонентами, но в классе „А“ за HCO_3 по величине процентного содержания следует Cl, тогда как в классе „В“ за HCO_3 следует SO_4 . В классы „С“ и „Д“ выделены воды с преобладанием Cl над остальными компонентами. В классе „С“ за Cl по величине процентного содержания HCO_3 , а в классе „Д“ следует SO_4 . В „Е“ и „F“ классы выделены воды с преобладанием SO_4 над остальными компонентами, при этом в классе „Е“ за SO_4 по величине процентного содержания следует HCO_3 , а в классе „F“ следует Cl.

Каждый класс вод, в свою очередь, подразделяется на три подкласса, изображаемых цифровым индексом внизу 1,2,3. Воды с индексом „1“—это воды, в составе которых (отдельно катионном и анионном) значительно преобладает один компонент над остальными компонентами. Воды с индексом „2“—это воды, в составе которых преобладают два компонента, разнящихся между собой на незначительную величину. Воды с индексом „3“ имеют все три компонента почти равновеликими, с небольшой разницей между ними.

Таблица 1

Компоненты химического состава вод расположены в порядке убывания их процентного содержания

Подкласс	Преобладающие компоненты	Химическая характеристика вод
К а т и о н ы		
I класс $Na > Ca > Mg$		
I ₁	Na	натриевые
I ₂	Na, Ca	натриево-кальциевые
I ₃	Na, Ca, Mg	натриево-кальциево-магниево-
II класс $Na > Mg > Ca$		
II ₁	Na	натриевые
II ₂	Na, Mg	натриево-магниево-
II ₃	Na, Mg, Ca	натриево-магниево-кальциевые
III класс $Ca > Na > Mg$		
III ₁	Ca	кальциевые
III ₂	Ca, Na	кальциево-натриевые
III ₃	Ca, Na, Mg	кальциево-натриево-магниево-
IV класс $Ca > Mg > Na$		
IV ₁	Ca	кальциевые
IV ₂	Ca, Mg	кальциево-магниево-
IV ₃	Ca, Mg, Na	кальциево-магниево-натриевые

V класс $Mg > Na > Ca$

V_1	Mg	магниевые
V_2	Mg, Na	магниево-натриевые
V_3	Mg, Na, Ca	магниево-натриево-кальциевые

VI класс $Mg > Ca > Na$

VI_1	Mg	магниевые
VI_2	Mg, Ca	магниево-кальциевые
VI_3	Mg, Ca, Na	магниево-кальциево-натриевые

А н и о н ы

Класс „А“ $HCO_3 > Cl > SO_4$

A_1	HCO_3	гидрокарбонатные
A_2	HCO_3, Cl	гидрокарбонатно-хлоридные
A_3	HCO_3, Cl, SO_4	гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатные

Класс „В“ $HCO_3 > SO_4 > Cl$

B_1	HCO_3	гидрокарбонатные
B_2	HCO_3, SO_4	гидрокарбонатно-сульфатные
B_3	HCO_3, SO_4, Cl	гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридные

Класс „С“ $Cl > HCO_3 > SO_4$

C_1	Cl	хлоридные
C_2	Cl, HCO_3	хлоридно-гидрокарбонатные
C_3	Cl, HCO_3, SO_4	хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатные

Класс $D^+ Cl > SO_4 > HCO_3$

D_1	Cl	хлоридные
D_2	Cl, SO_4	хлоридно-сульфатные
D_3	Cl, SO_4 , HCO_3	хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные

Класс $E^+ SO_4 > HCO_3 > Cl$

E_1	SO_4	Сульфатные
E_2	SO_4 , HCO_3	сульфатно-гидрокарбонатные
E_3	SO_4 , HCO_3 , Cl	сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридные

Класс $F^+ SO_4 > Cl > HCO_3$

F_1	SO_4	сульфатные
F_2	SO_4 , Cl	сульфатно-хлоридные
F_3	SO_4 , Cl, HCO_3	сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатные

Все это графически изображается следующим образом.

Порядок компонентов на графике сохраняется тот же. Процентное значение их откладывается от вертикальной прямой на равных расстояниях друг от друга вправо по горизонтальной составляющей. Как видно из черт. 1, для вод I и „А“ классов ломанная линия сохраняет уклон влево, для вод II и „В“ классов образует угол вершиной влево и более длинной стороной является верхняя сторона угла. Для вод III и „С“ классов образует угол вершиной направо и длинной стороной угла является нижняя сторона. Для вод IV и „Д“ классов ломанная линия образует угол вершиной направо и длинной стороной угла является верхняя сторона. Для вод V и „Е“ классов ломанная линия образует угол вершиной влево и длинной стороной угла является нижняя сторона. Для вод VI и „F“ классов ломанная линия сохраняет уклон направо.

Воды всех классов с индексом „1“ имеют наиболее длинную ломанную линию, с индексом „2“ ломанную линию средней длины, с индексом „3“ короткую ломанную линию. Таким образом, по конфигурации пика сразу можно определить подкласс воды.

Как уже было сказано, на основании комбинации вышеуказанных подклассов выделяются 108 подклассов химического состава вод ($I_1 A_1, I_1 A_2, I_1 A_3, \dots, VI_1 F_1, VI_1 F_2, VI_1 F_3$). На графиках этого искусственно соединены пунктиром величины Mg и HCO_3 .

Попутно из этих пиках с легкостью может быть графически изображена и Пальмеровская классификация вод.

Как видно из черт. 3, „верхняя точка“ является показателем величины процентного содержания щелочей. „Нижняя точка“ является показателем величины процентного содержания сильных кислот—она получается путем опускания перпендикуляра на нижнюю горизонтальную линию из точки, определяющей величину содержания Cl с прибавлением к полученному отрезку величины SO_4 .

Известно, что в первом классе Пальмера содержание сильных кислот меньше содержания щелочей и, таким образом, прямая, соединяющая „верхнюю“ и „нижнюю“ точки, будет иметь уклон влево. Величина S_1 (первичная соленость) равна двойной величине отрезка прямой от начальной вертикали до „нижней“ точки. Величины A_1 (первичная щелочность) определяется наклоном прямой, соединяющей „верхнюю“ и „нижнюю“ точки, и равна двойной величине отрезка прямой от „нижней“ точки до перпендикуляра, опущенного из „верхней“ точки на нижнюю горизонтальную прямую. В этом случае A_2 (вторичная щелочность) определяется процентным содержанием щелочных земель и равна двойной величине отрезка прямой от начальной вертикали до так называемой „средней точки“, представляющей собой в данном случае суммарное содержание Ca и Mg .

В водах второго класса Пальмера содержание сильных кислот равно содержанию щелочей и прямая, соединяющая „верхнюю“ и „нижнюю“ точки будет строго вертикальной. Величина S_1 равна двойной величине отрезка прямой от начальной вертикали до „нижней“ точки. Величина A_2 равна двойному расстоянию от начальной вертикали до „средней точки“, но в данном случае „средняя точка“ является показателем процентного содержания слабых кислот (HCO_3).

В водах III класса Пальмера содержание сильных кислот больше содержания щелочей. Значит, прямая, соединяющая „верхнюю“ и „нижнюю“ точки будет иметь наклон вправо, при этом величина S_1 для данного случая равна двойному расстоянию от начальной вертикали до основания перпендикуляра, опущенного из верхней точки на нижнюю горизонтальную прямую. Величина S_2 (вторичная соленость) определяется наклоном прямой, соединяющей „верхнюю“ и „нижнюю“ точки, и равна двойной величине отрезка нижней прямой от основания вышеуказанного перпендикуляра до „нижней точки“. Величина A_2 равняется опять-таки двойному расстоянию от начальной вертикали до „средней“ точки. Положение „средней“ точки и в этом случае определяется процентным содержанием слабых кислот (HCO_3).

Аналогичные графические построения могут быть произведены и для IV и V классов Пальмера, но, так как воды этих классов встречаются значительно реже, на них мы не останавливаемся в настоящей статье.

Гипотетический солевой состав вод находит в пиках свое прекрасное отображение и может быть по ним легко определен на глаз, без каких-либо вспомогательных графических построений. Числовые величины содержания отдельных солей определяются самыми простыми графическими построениями — последовательным соединением катионов с анионами согласно порядку соединения их, принятому по системе Фрезениуса. Так, для вод подкласса $I_1 A_1$ (табл. 2), где Na намного больше Cl, содержание последнего откладывается на отрезке прямой, определяющем содержание Na, и величина полученного отрезка соответствует процентному содержанию соли NaCl. Отрезок прямой, соответствующий остаточному содержанию Na, т. е. Na-Cl, ввиду отсутствия в химическом составе данной воды следующего порядкового аниона SO_4 , откладывается на отрезке прямой, соответствующей процентному содержанию HCO_3 , и полученный отрезок равняется процентному содержанию в анализе соли $NaHCO_3$. Отстаток HCO_3 соединяется таким же путем с Mg и Ca. В представленных анализах (подкласс $I_1 A_1$) вод преобладает соль $NaHCO_3$, что видно непосредственно из графика и из наименования подкласса, указывающего на преобладание Na и HCO_3 над остальными компонентами.

В составе вод подкласса $I_1 C_2$ (табл. 2) преобладают соли NaCl и $Ca(HCO_3)_2$. Это ясно видно из графика и может быть доказано производством тех же построений в том же порядке. Натрия немного больше хлора и поэтому почти весь он идет на соединение с хлором. Таким образом, соль $NaHCO_3$ содержится в анализе в небольшом количестве, а значительное количество HCO_3 , почти равное содержанию Cl, идет на соединение с Mg и Ca. Ввиду довольно значительного содержания Ca следующей по процентному содержанию после NaCl является соль $Ca(HCO_3)_2$.

В водах класса $III_1 A_1$ (табл. 2), как ясно видно из графика, преобладает соль $Ca(HCO_3)_2$ при небольшом содержании соли NaCl.

В водах класса $IV_2 A_1$ (табл. 2) преобладают соли $Mg(HCO_3)_2$ и $Ca(HCO_3)_2$ при очень небольшом содержании соли $MgCl_2$ и совсем незначительном соли NaCl.

В предлагаемой нами методике отсутствует учет минерализации воды. Но если все построения основывать не на процентном содержании отдельных компонентов, а выражать их в мг-эквивалентной форме, то на пиках отразится и минерализация воды. Однако, в таком случае при сравнении между собой сильно и мало минерализованных вод могут встретиться серьезные затруднения с выбором масштаба пик. Поэтому лучше всего, в случае необходимости учета

минерализации воды, показывать ее в виде вертикального столбика слева от пикн.

Вышеизложенная методика разбивки вод применялась нами при массовой обработке анализов подземных вод Мисхано-Памбакского гидрогеологического района и дала интересные результаты.

Главным преимуществом нашей методики над существующими является более дробное подразделение вод и учет самых незначительных изменений в химическом составе, не учитываемых другими более грубыми классификациями вод. Так, нам удалось воды Мисхано-Памбакского гидрогеологического района, почти однотипные по остальным разбивкам разбить на классы и подклассы и, таким образом, установить их зависимость от вмещающих пород. Воды, приуроченные к щелочным сиенитам и к контакту лав с сиенитами, все были отнесены к подклассу $III_1 A_1$ (преобладающее значение имеют Ca и HCO_3). Воды на контакте лав с кварцевыми диоритами относятся уже в большинстве своем к подклассу $III_2 A_1$, т. е. наряду с Ca большое значение получает и Na . Воды, выходящие в самих кварцевых диоритах, относятся уже к подклассу $I_1 A_1$. В них Ca уменьшается. Преобладают Na и HCO_3 . Воды палеозойской толщи относятся к большинству к подклассу $IV_2 A_2$, т. е. наряду с Ca приобретают значение и Mg , наряду с HCO_3 и Cl .

Придерживаясь нашей методики, даже в одном подклассе вод можно по отдельным графикам проследить все малейшие колебания содержания в химическом составе вод тех или иных компонентов.

Таким образом, при кропотливом и детальном разборе химического состава вод одного небольшого района, когда есть возможность графического изображения каждого анализа, предлагаемая нами методика является наилучшей. Для массовой обработки очень большого количества анализов и сравнения между собой отдельных гидрогеологических провинций наша методика является чересчур дробной и уступает место другим, более грубым классификациям вод.

Институт Геологических Наук
Академии Наук Армянской ССР.

Подступило 11 XII 1948.

Ն. Բ. Գալուստյան

ԲՆԱԿԱՆ ԶՐԵՐԻ ԿԼԱՍԻՖԻԿԱՑԻԱՅԻ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ԿԱԶՄԸ ԳՐԱՖԻԿՈՐԵՆ ԱՐՏԱՀԱՅՏԵԼՈՒ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հեղինակն առաջարկում է ջրերի կլասիֆիկացիայի և նրանց կազմը գրաֆիկորեն արտահայտելու նոր մեթոդ: Մեթոդի հիմքում զբաղված է ջրերի քիմիական կազմի 6 գլխավոր բաղադրիչ կոմպոնենտների Na , Ca , Mg , HCO_3 , Cl և SO_4 -ի փոխարարերով թյուրը:

Առանձնացվում է 36 հիմնական դաս, գրաֆիկորեն արտահայտվում են սեպի ձևով: Վերջիններին վրա կարելի է արտահայտել միաժամանակ ջրերի կլասիֆիկացիան բառ Պարմերի:

«Սեպերի» օգնություն հեշտություն կարելի է հաշվել ջրերի կլասիֆիկացիան հիպոտետիկ ազային կազմը:

Դսյություն ունեցող մեթոդների նկատմամբ առաջարկած մեթոդի առավելությունը կայանում է նրանում, որ կատարվում է ջրերի ալիքի կոտորակային ենթարաժանում, հաշվի են առնվում քիմիական կազմի ամենաաննշան փոփոխությունները, որոնք հաշվի չեն առնվում ալիքի կոպիտ ալլ կլասիֆիկացիաների դեպքում:

ГИДРАВЛИКА

А. К. Анянян

**Применение теории пограничного слоя к определению
потери напора на переходных участках открытой
деривации**

Постановка задачи

Многочисленные опыты и исследования показали, что в непосредственной близости к обтекаемому телу поток жидкости затормаживается и в нем возникают сильные вихри. Эти вихри, возникнув, сохраняются долго, увлекаются общим течением жидкости и вытягиваются за телом в вихревые усы и беспорядочно завихренные хвосты (рис. 1).

Опыты показали, что сопротивление тела, оказываемое им потоку, в основном сосредотачивается в этом слое, и поэтому изучение свойства пограничного слоя лежит в основе теории сопротивления.

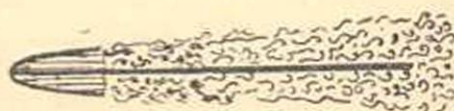


Рис. 1.

При обтекании жидкостью двух длинных пластинок, поставленных рядом друг с другом, пограничные слои постепенно погружаются в ядро. На определенном расстоянии они пересекаются; дальше жидкость полностью охватывается пограничным слоем (рис. 2).

В пределах нарастающих пограничных слоев имеется беспрерывное переформирование эпюры скоростей; в ядре течения скорости почти остаются постоянными (конечно только в пределах каждого рассматриваемого сечения); за пределами линии пересечения пограничных слоев изменение скоростей больше не происходит, если, конечно, никакие внешние причины не нарушают эти условия.

Мы рассматривали пример обтекания жидкостью двух рядом поставленных пластинок, так как это имеет большое практическое значение. В частном случае, течение жидкости вдоль стенок и канала можно представить как одностороннее обтекание пластинки жидкостью.

Необходимо отметить, что скорости в толще пограничного слоя меняются по определенным законам, принципиально различным для ламинарного и турбулентного пограничных потоков.

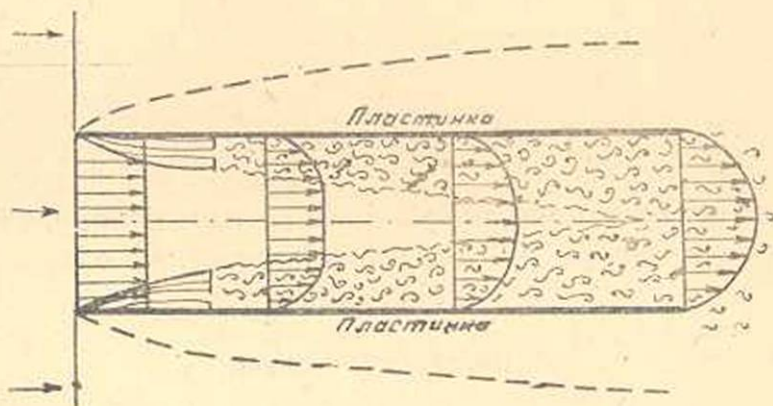


Рис. 2.

Определение длины начального участка, на протяжении которого профиль распределения скоростей приобретает свою окончательную форму, имеет весьма важное практическое значение.

Несомненно, указанное распределение скоростей по длине переходного участка сильно отличается от нормального. Кроме того, перераспределение скоростей по длине переходного участка создает иную работу силы трения, которая должна быть оценена как потеря напора на местные сопротивления [2].

Было бы ошибочным считать, что при изменении сечения или направления струй потери напора ограничиваются местом сужения потока и что непосредственно за местом сужения устанавливаются нормальные скорости. Опытами было установлено, что потери напора имеют место не только на том коротком участке, где происходит преобразование в распределении скоростей потока. Потери возникают на гораздо большем протяжении (главным образом, вниз по течению) и имеют место до того сечения, где эпюра скоростей принимает свою окончательную „установившуюся“ форму. Эти формы принципиально различны для ламинарного и турбулентного потоков.

Обращаясь к вопросу, которому посвящена настоящая статья отмечаем, что источник потери напора на переходных участках надо искать в изменении и нарушении нормального распределения скоростей в поперечном сечении. Эти изменения влияют на величину силы внутреннего трения между отдельными частицами. Таким образом потери напора на переходном участке не ограничиваются только длиной того участка, на протяжении которого сечения переходят одно в другое. Наличие перехода сказывается на значительно большем расстоянии, которое в конечном счете определяется местом

пересечения пограничных слоев, развивающихся по периметру того или иного поперечного сечения (рис. 3, 4).

Из вышесказанного ясно, что потери напора на переходном участке складываются из потерь, возникающих в зоне изменения профиля поперечного сечения и из потерь на участке, в пределах которого скорости постепенно перераспределяются и эпюра их распределения принимает „нормальную“ форму. Длину этого участка можно определить, пользуясь теорией турбулентного слоя, при обтекании тел.

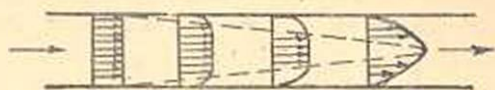


Рис. 3.

Определение длины входного участка для турбулентного безнапорного движения жидкости

Рассмотрим переход потока из канала прямоугольного сечения в тоннель круглого сечения (рис. 4).

С гидромеханической точки зрения имеет место движение жидкости в конфузоре, так как сечение канала постепенно и симметрично суживается и переходит в тоннель круглого сечения.

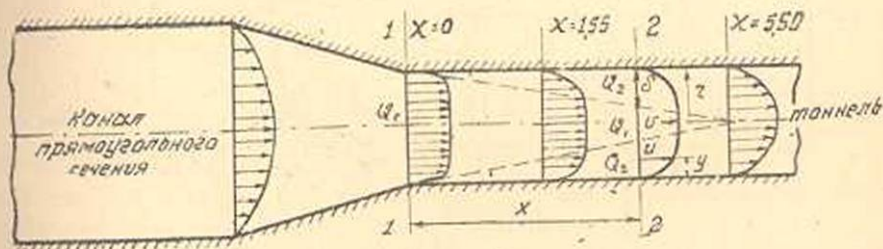


рис. 4.

Рис. 4.

Как известно из гидромеханики, в конфузоре не наблюдается отрыва струй и вихрей на всем протяжении его поверхности вследствие того, что место наименьшего давления, благодаря форме конфузора, находится в его концевом сечении [1,5]. Кроме того, произведенные Гидроэлектрической лабораторией Водно-Энергетического Института Академии Наук Арм. ССР, под руководством проф. И. В. Егиазарова, измерения поля скоростей на моделях деривации ГюмүшГЭС показывают равномерное распределение скоростей в сечении кроме зоны у дна канала, где невозможно было производить измерения трубкой Пито-Ребока (рис. 5). Эти теоретические и опытные данные дают возможность считать, что пограничный слой в основном начинает развиваться от начального сечения входного тоннеля.

Для исследования закономерности развития турбулентного слоя в тоннеле можно пользоваться интегральным условием Кармана, так как оно относится лишь к импульсам и силам, а беспорядочная пульсация скоростей на количестве движения не отразится. Однако, для учета трения нельзя пользоваться формулой Ньютона с градиентом скорости для μ , так как она справедлива лишь для ламинарного

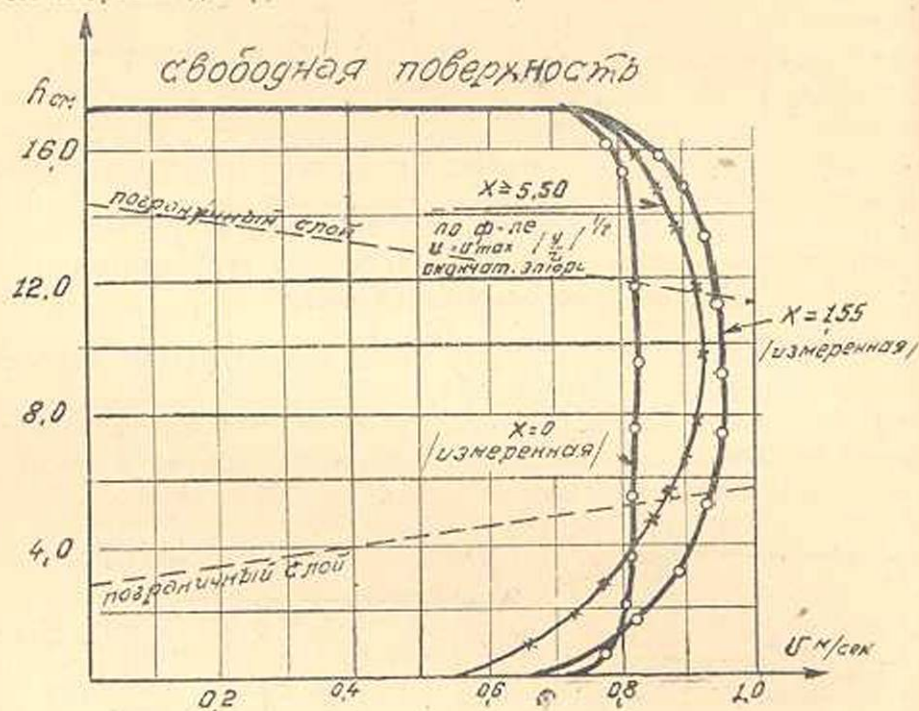


Рис. 5.

ного движения [9]. Правда, по современным взглядам и при турбулентном пограничном слое жидкость на поверхности тела неподвижна и всегда имеется очень тонкий ламинарный подслой, в котором собственно и происходит трение. Этот путь теоретического исследования, основанный на анализе ламинарного подслоя, оказывается очень трудным. Поэтому предпочитают пользоваться прямо результатами опытов по исследованию трения пограничного слоя о тело. Прандтль и Карман, на основании весьма тщательно произведенных опытов Блазиуса и Никурадзе вывели формулу (16) (стр. 558) для определения напряжения трения в турбулентном слое.

Наше решение поставленной задачи по определению длины входного участка конфузора отличается от решения аналогичной задачи Шиллера [3,6] следующим:

1. Нами рассматривается развитие турбулентного слоя, где распределение скоростей подчиняется степенному закону, что коренным образом отличается от параболического закона распределения скоростей в ламинарном слое;

2. напряжение трения, в силу сказанного выше, принимается не по закону Ньютона, а по закону турбулентного перемешивания;

3. рассматривается безвихорное движение жидкости в круглой трубе (несимметричная задача);

4. при составлении дифференциального уравнения движения турбулентного пограничного слоя нами учтена и работа силы тяжести.

Прежде чем перейти к выводу расчетных формул, ставим следующие допущения:

1. Ядро течения, толщина которого постепенно уменьшается, имеет во всех точках постоянную скорость (рис. 6). Опыты Гидроэлектрической лаборатории и различных исследователей подтверждают справедливость этого допущения (рис. 5).

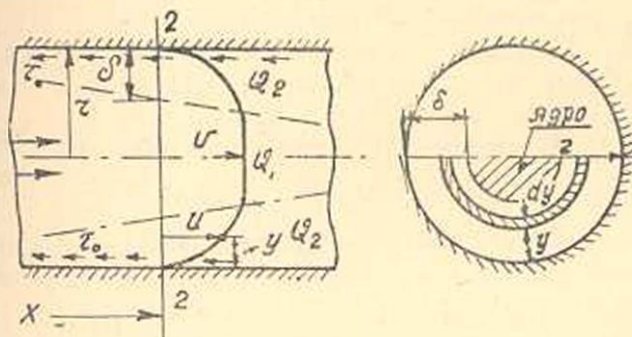


Рис. 6.

2. Турбулентный слой, толщина которого постепенно увеличивается, имеет скорости, величины которых (как в окончательно развившемся течении, так и в промежуточных стадиях его развития) определяются по степенному закону Прандтля (рис. 5).

Вопрос о законах распределения скоростей в турбулентном слое имеет важное значение вследствие непосредственной связи его с общей задачей сопротивления.

Прандтль [1,7] сделал из опытов Блазиуса и Никурадзе заключение, что скорость турбулентного потока вблизи стенки меняется пропорционально расстоянию от стенки, взятому в степени $n = \frac{1}{7}$ „закон корня седьмой степени“.

Приведенными в литературе (1,7) сравнительными анализами законов логарифмического распределения скоростей и различных степенных $\left(n = \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9} \right)$ законов установлено, что область при-

менения степени $n = \frac{1}{7}$ дает практически удовлетворительные результаты в пределах числа $Re = 10^5$ до $2 \cdot 10^7$. При более высоких числах Re степень должна быть заменена $\frac{1}{8}$ или $\frac{1}{9}$.

3. Скорости в ядре не меняются и остаются постоянными в пределах рассматриваемого поперечного сечения (рис. 5, 6).

Принятое допущение, конечно, условно, но для турбулентного потока вполне допустимо, так как эпюра скоростей в толще сечения ядра с глубиной изменяется незначительно. На это указывают опыты, произведенные Гидроэлектрической лабораторией Водно-Энергетического Института АН Арм. ССР (рис. 5).

4. Уравнение Бернулли применимо для рассматриваемого переходного участка, так как течение в ядре подчиняется приблизительно закону потенциального движения.

Давление в ядре течения считается переходящим без изменения в давление пограничного слоя (в том же поперечном сечении). Такое допущение принято и Шиллером [3].

5. Многочисленные эксперименты многих исследователей и опыты „ГЭЛ“ показали, что отношение максимальной скорости к

средней для турбулентного потока лежит в пределах $\frac{V_{\max}}{V_{\text{ср}}} = 1,2 \div 1,15$. [8,4].

Учтя все вышеуказанные допущения, переходим к составлению уравнения неразрывности и изменения количества движения для выделенного отсека (рис. 4).

Составим уравнения неразрывности для входного и произвольно взятого сечения на расстоянии x от входа (рис. 4)

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \dots \quad \text{где} \quad (1)$$

Q_0 — расход жидкости, проходящий через входное сечение (1—1)

Q_1 — расход жидкости, проходящий через толщу ядра, (сечение 2—2).

Q_2 — расход жидкости, проходящей через толщу пограничного слоя (сечение 2—2, рис. 6).

$$Q_0 = F_0 V_0 = \frac{\pi r^2}{2} \cdot V_0 \quad (2)$$

$$Q_1 = F \cdot V = \frac{\pi (r - \delta)^2}{2} \cdot V \quad (3)$$

Согласно допущению 2 скорость V остается постоянной только для данного рассматриваемого сечения (рис. 5) и меняется по длине входного участка.

$$Q_2 = F_2 \cdot U \quad \text{где}$$

U — скорость в толще пограничного слоя. Она определяется по формуле Праудтля [1].

$$U = V \left(\frac{y}{\delta} \right)^n \quad (4)$$

$$Q_2 = \int_0^{\delta} \pi (r - y) U dy \quad (5)$$

где δ переменная толщина турбулентного слоя.

Уравнение неразрывности (1) примет вид

$$\frac{\pi r^2}{2} \cdot V_0 = \frac{\pi(r-\delta)^2}{2} V + \int_0^\delta \pi(r-y) U dy \quad (6)$$

После раскрытия уравнения (6) с учетом уравнения (4) получаем

$$\begin{aligned} \int_0^\delta \pi(r-y) V \left(\frac{y}{\delta}\right)^n dy &= \pi r V \int_0^\delta \left(\frac{y}{\delta}\right)^n dy - \pi V \int_0^\delta y \left(\frac{y}{\delta}\right)^n dy = \\ &= \frac{\pi r V}{n+1} \cdot \delta - \frac{\pi V}{n+2} \delta^2 \quad \text{или принимая } n = \frac{1}{7}, \end{aligned}$$

$$\int_0^\delta \pi(r-y) V \left(\frac{y}{\delta}\right)^n dy = \frac{7\pi r V}{8} \delta - \frac{7\pi V}{15} \delta^2$$

$$\pi r V_0 = \pi \left(r^2 - 2\delta r + \delta^2 \right) + 2 \left(\frac{7\pi r V}{8} \delta - \frac{7\pi V}{15} \delta^2 \right) \quad (7)$$

После ряда простых преобразований уравнение (7) примет вид

$$\frac{V_0}{V} = 1 - \frac{1}{4} \frac{\delta}{r} + \frac{1}{15} \left(\frac{\delta}{r} \right)^2$$

или

$$\left(\frac{\delta}{r} \right)^2 - \frac{15}{4} \left(\frac{\delta}{r} \right) + 15 \left(1 - \frac{V_0}{V} \right) = 0 \quad (8)$$

После решения уравнения (8) получим

$$\frac{\delta}{r} = \frac{15}{8} \pm \sqrt{\left(\frac{15}{8} \right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V} \right)} \quad (9)$$

Как видно из уравнения (9), отношение толщины пограничного слоя к радиусу трубы двучленное (для одного и того же поперечного сечения), что физически не может иметь места. Для определения знака уравнения (9), прибегаем к следующим пограничным условиям: При $x=0$ $V=V_0$; тогда уравнение 9 дает $\delta=0$ при знаке минус перед вторым членом правой части.

При $x=L$ (точка, где пересекаются пограничные слои)

$$\frac{\delta}{r} = 1$$

Принимая (по условию 5): $\frac{V_{cp}}{V_{max}} = 0.82[8]$ и подставляя это значение

в уравнение (9), получаем $\frac{\delta}{r} = 1$.

Таким образом уравнение (9) удовлетворяет пограничным условиям при знаке минус перед вторым членом правой части.

$$\frac{\delta}{r} = \frac{15}{8} - \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} \quad (9^a)$$

Для определения точки пересечения турбулентного пограничного слоя с осью трубы, составляем уравнение изменения количества движения для выделенного отсека (рис. 4).

Изменение количества движения должно равняться импульсу сил в единицу времени.

$$m_1 V_1 - m_2 V_0 = \Sigma p \cdot t \quad (10)$$

Из действующих на выделенный объем сил должны быть приняты во внимание: силы гидродинамического давления в сечениях 1—1 и 2—2, силы тяжести и касательные силы, действующие у боковых поверхностей, ограничивающих данный объем.

$$K = P + G - T \quad (10^a)$$

$$m_2 V_0 = \frac{\pi r^2}{2} \cdot V_0^2 \cdot \rho \quad (11)$$

$$m_1 V_1 = mV + m'U$$

mV —количество движения в толще ядра,

$m'U$ —количество движения в турбулентном пограничном слое.

$$mV = \rho \frac{\pi(r-\delta)^2}{2} \cdot V^2 \quad (12)$$

$$m'U = \int_0^{\delta} \pi \rho (r-y) U^2 dy \quad (13)$$

Гидродинамическое давление (движущую силу) по условию 5 можно определить из уравнения Бернулли

$$P = \rho \frac{\pi r^2}{2} \cdot \frac{V^2 - V_0^2}{2} \quad (14)$$

Сила тяжести может быть отброшена ввиду малости объема жидкости между двумя очень близко выделенными сечениями. Однако, ввиду возможности распространить выводы и на сечения, отстоящие друг от друга на произвольное расстояние, не представляет трудности принятие во внимание и этой силы.

$$G = \int_0^x \frac{\pi r^2}{2} \sin \alpha dx = \int_0^x \rho g \frac{\pi r^2}{2} \sin \alpha dx \quad (15)$$

Остается найти импульс касательных сил у боковых поверхностей, ограничивающих данный объем, что является существенным вопросом в рассматриваемой задаче турбулентного пограничного

слой в отличие от ламинарного, принятого Шиллером. В этом случае применение закона Ньютона о силах трения отпадает.

Как известно, первое решение задачи о сопротивлении пластины турбулентному потоку было дано одновременно Прандтлем и Карманом, которые использовали при этом опыты Никурадзе и Блазиуса [1,9].

Напряжение трения в турбулентном слое по Прандтлю [1,9] (рис. 6) равняется

$$\tau_0 = \xi \rho V^2 = \left(\frac{y}{rV} \right)^{1/4} = \xi \rho V^2 \cdot Re^{-1/4} \quad (16)$$

Импульсы суммарных сил трения на поверхности рассматриваемого отсека

$$T = - \int_0^x \pi r \tau_0 dx = - \int_0^x \pi r \xi Re^{-1/4} \rho V^2 dx \quad (17)$$

Уравнение количества движения с учетом уравнений (11—17) примет вид:

$$\begin{aligned} & - \rho \frac{\pi r^2}{2} V_0^2 + \rho \frac{\pi (r-\delta)^2}{2} V^2 + \int_0^\delta \pi \rho (r-y) U^2 dy = \\ & = \rho \frac{\pi r^2}{2} \cdot \frac{V^2 - V_0^2}{2} - \pi r \int_0^x \xi \rho V^2 \cdot Re^{-1/4} dx + \int_0^x \rho g \frac{\pi r^2}{2} \sin \alpha dx \end{aligned} \quad (18)$$

Рассмотрим отдельно левую часть уравнения (18)

$$\begin{aligned} k &= - \rho \frac{\pi r^2}{2} V_0^2 + \rho \frac{\pi (r-\delta)^2}{2} V^2 + \int_0^\delta \pi \rho (r-y) U^2 dy \\ &= \int_0^\delta \pi \rho (r-y) V^2 \left(\frac{y}{\delta} \right)^{2n} dy = \frac{7}{9} \pi r \rho V^2 \delta - \frac{7}{16} \pi \rho V^2 \cdot \delta^2 \end{aligned} \quad (19)$$

После ряда преобразований получаем:

$$\begin{aligned} k &= - \pi \rho \frac{r^2 V_0^2}{2} + \pi \rho \frac{V^2 r^2}{2} \left[1 - 2 \frac{\delta}{r} + \left(\frac{\delta}{r} \right)^2 \right] + \\ &+ 7 \pi \rho V^2 r^2 \left[\frac{1}{9} \cdot \frac{\delta}{r} - \frac{1}{16} \left(\frac{\delta}{r} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (20)$$



Подставляя значение $\frac{\delta}{r}$ из уравнения (9а) в уравнение (20), получим:

$$k = -\rho\pi \frac{r^2}{2} \cdot V_0^2 + \pi\rho \frac{V^2}{2} \cdot r^2 \left[-\frac{686}{64} - \frac{14}{18} \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} + \right. \\ \left. + 15 \frac{V_0}{V} \right] + 7\pi\rho V^2 r^2 \left[0,708 + \frac{142}{1152} \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} - \frac{15}{16} \cdot \frac{V_0}{V} \right] \quad (21)$$

Приращение количества движения из уравнения (10а)

$$\frac{dk}{dx} = \frac{dP}{dx} + \frac{dG}{dx} - \frac{dT}{dx} \quad \text{или}$$

$$dk = dP + \frac{dG}{dx} dx - \frac{dT}{dx} \cdot dx \quad (20) \text{ где}$$

$$dk = \pi\rho V r^2 \left\{ \left[-\frac{686}{64} - \frac{14}{8} \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} + 0,15 \frac{V_0}{V} \right] + \right. \\ \left. + \rho \frac{\pi V^2}{2} r^2 \left\{ \frac{14}{16} \left[\left(\frac{15}{16}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \cdot \frac{15V_0}{V} - \frac{15V_0}{V^2} \right\} + \right. \\ \left. + 14 \pi\rho V r^2 \left[0,708 + \frac{142}{1152} \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} - \frac{15}{16} \cdot \frac{V_0}{V} \right] + \right. \\ \left. + 7\pi\rho V^2 r^2 \left\{ -\left[\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \cdot \frac{142}{2304} \cdot \frac{15V_0^2}{V^2} + \frac{15V_0}{16V^2} \right\} \right\} dV \quad \text{или} \\ dk = \pi r^2 \rho \left\{ -0,8V - 0,025V \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} + \right. \\ \left. + 0,95 V_0 + 0,1 V_0 \left[\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \right\} dV \quad (22)$$

$$dP = \frac{\pi r^2}{2} \rho V dV$$

$$dG = -d \int \rho g \frac{\pi r^2}{2} \sin \alpha dx \quad \text{или}$$

$$\frac{dG}{dx} = + \rho g \frac{\pi r^2}{2} \sin \alpha \quad (23)$$

$$dT = -d \int \xi \rho V^2 R_c^{-1/4} \pi r dx \quad \text{или}$$

$$\frac{dT}{dx} = -\xi \rho V^2 R_c^{-1/4} \cdot \pi r \quad (24)$$

Уравнение (22) изменения количества движения примет вид

$$\pi r^2 \rho \left\{ -0,8V - 0,025V \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} + 0,95 V_0 + \right. \\ \left. + 0,1V_0 \left[\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \right\} dV = \frac{\pi r^2}{2} \cdot \rho V dV + g \rho \frac{\pi r^2}{2} \cdot \sin \alpha dx - \\ - \pi r \rho \xi V^2 R_e^{-1/4} dx \quad (25)$$

Сокращая на πr и выделяя переменные из уравнения (25), получим

$$r \left\{ -1,3V - 0,025V \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} + \right. \\ \left. + 0,95 V_0 + 0,1 V_0 \left[\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \right\} dV = \\ = \left(g \cdot \frac{r}{2} \sin \alpha - \xi V^2 \cdot R_e^{-1/4} \right) dx \quad \text{или}$$

$$dx = \frac{r}{g \frac{r}{2} \sin \alpha - \xi V^2 R_e^{-1/4}} \left\{ -1,3V - 0,025V \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} + \right. \\ \left. + 0,95 V_0 + 0,1 V_0 \left[\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \right\} dV \quad (26)$$

При малых уклонах дериивации величиной $g \frac{r}{2} \sin \alpha$ (ввиду малости $\sin \alpha$) можно пренебречь по сравнению с $\xi V^2 R_e^{-1/4}$. Учет этого члена в уравнении (26) принципиальной трудности не представляет, но ради упрощения задачи нами этот член отброшен.

$$dx = \frac{r}{\xi^2 R_e^{-1/4}} \left[\frac{13}{V} + \frac{0,025}{V} \sqrt{\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)} - 0,95 \frac{V_0}{V^2} - \right. \\ \left. 0,1 \frac{V_0}{V^2} \left[\left(\frac{15}{8}\right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \right]^{-1/2} \right] dV. \quad (27)$$

Для облегчения интегрирования уравнения (27) обозначим

$$m = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{V}{V_0} - 1 \quad (28)$$

$$V = V_0 (1 + m) \quad dV = V_0 dm$$

Пределы изменения m от нуля до m'

$$\int_0^m \frac{1,3}{V} = 1,3 \ln(1+m)$$

$$\int_0^m \frac{0,025}{V_0(1+m)} \sqrt{\frac{15}{1+m} - 11,48} V_0 dm = \int_0^m \frac{0,025}{1+m} \sqrt{\frac{3,52 - 11,48 m}{1+m}} dm$$

Делая подстановку $1+m=t^2$ или $dm=2tdt$, получим

$$\int_0^m \frac{0,025}{1+m} \sqrt{\frac{3,52 - 11,48 m}{1+m}} dm = 0,17 \int \frac{\sqrt{1,31-t^2}}{t^2} dt =$$

$$= -0,17 \left[\frac{\sqrt{1,31-m}}{\sqrt{1+m}} + \arcsin \frac{\sqrt{1+m}}{1,145} \right] + 0,278$$

$$\int 0,95 \frac{V_0}{V^2} dV = -0,95 \left(1 - \frac{1}{1+m} \right)$$

$$\int 0,1 \frac{V_0}{V^2} \left[\left(\frac{15}{8} \right)^2 - 15 \left(1 - \frac{V_0}{V} \right) \right] dV = 0,1 \int \frac{V_0 dV}{V^2 \sqrt{15 \frac{V_0}{V} - 11,48}}$$

Делая подстановку $\frac{V_0}{V} = x$ $dV = -\frac{V_0}{x^2} dx$

$$= -0,1 \int \frac{dx}{\sqrt{15x - 11,48}} = -0,0133 \left[\sqrt{\frac{15}{1+m} - 11,48} - 1,88 \right]$$

Подставляя полученные интегралы в уравнение (27), получим

$$L_x = \frac{r R_e^{1/4}}{\xi} \left\{ -0,70 + 1,3 \ln(1+m) + \frac{0,95}{1+m} - \right. \\ \left. - 0,17 \left[\sqrt{\frac{0,31-m}{1+m}} + \arcsin \frac{\sqrt{1+m}}{1,145} \right] + 0,0133 \sqrt{\frac{15}{1+m} - 11,48} \right\} \quad (29)$$

$$\text{или} \quad L_x = \frac{r R_e^{1/4}}{\xi} f(m) \quad (30)$$

Эта окончательная формула устанавливает связь между тремя безразмерными величинами

$\frac{L_x}{r}$, $\frac{R_e^{1/4}}{\xi}$, $f(m)$ и дает возможность очень просто вычислять длину входного участка, т. е. ту длину, на протяжении которой скорости полностью переформировываются.

Полученное уравнение можно проверить по пограничным условиям, т. е. $x=0$, $V=V_0$ и толщине пограничного слоя $\delta=0$.

Действительно,

$$m = \frac{V}{V_0} - 1 = 0$$

из уравнения (29) при $m=0$ $f(m)=0$.

Для определения полной длины переходного участка необходимо принять (условие 5)

$$m = \frac{V}{V_0} - 1 = \frac{V}{0,82V} - 1 = 0,23$$

$$f(m) = \left\{ -0,70 + 1,3 \ln(1 + 0,23) + \frac{0,95}{1 + 0,23} - 0,17 \left[\sqrt{\frac{0,31 - 0,23}{1 + 0,23}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \arcsin \frac{\sqrt{1 + 0,23}}{1,145} \right] \right\} + 0,0133 \sqrt{\frac{15}{1 + 0,23}} - 11,48 = 0,0853$$

Значение коэффициента ξ можно взять равным [5,9] 0,025.

Полная длина входного участка будет

$$L = \frac{r}{\xi} Re^{1/4} f(m) = \frac{0,0853}{0,0250} r Re^{1/4} = 3,4 r Re^{1/4}$$

$$L = 3,4 r Re^{1/4} \quad (31)$$

Полная длина входного участка, полученная Шиллером для ламинарного лотка, равняется [3,6]

$$L_{\lambda} = 0,574 r Re \quad (32)$$

Как видно структура формул (31) и (32) в основном одинаковая, только с той принципиальной разницей, что значения коэффициентов $f(m)$ резко различаются и, что самое главное, число Рейнольдса в ламинарном потоке дано в первой степени. Так и надо было ожидать, так как при турбулентном движении жидкости скорости несравнимо быстрее выравниваются и длина входного участка вследствие этого становится более короткой по сравнению с ламинарным движением.

Для исследованных в „ГЭЛ“ [4] переходных участков, для которых $Re = 69000$ $r = 0,1$ м, длина турбулентного переходного участка по формуле (31) равна

$$L = 3,4 \times 0,1 \times 69000^{1/4} = 5,50 \text{ м}$$

Это подтверждается опытами, произведенными в „ГЭЛ“, а также многочисленными, чисто эмпирическими указаниями, имеющимися в литературе [2,10,11,12]. Эти указания даны для $\frac{L}{r} = 40 \div 60$,

при которых изменение профиля распределения скоростей заканчивается.

Длина ламинарного переходного участка по формуле Шиллера будет:

$$L_d = 0.574 \cdot 0.1 \times 69000 \approx 400 \text{ м или}$$

$$\frac{L}{r} = 4000.$$

Для облегчения вычислений значений коэффициентов $f(m)$ по формуле (29) составлены таблица и графики (рис. 7).

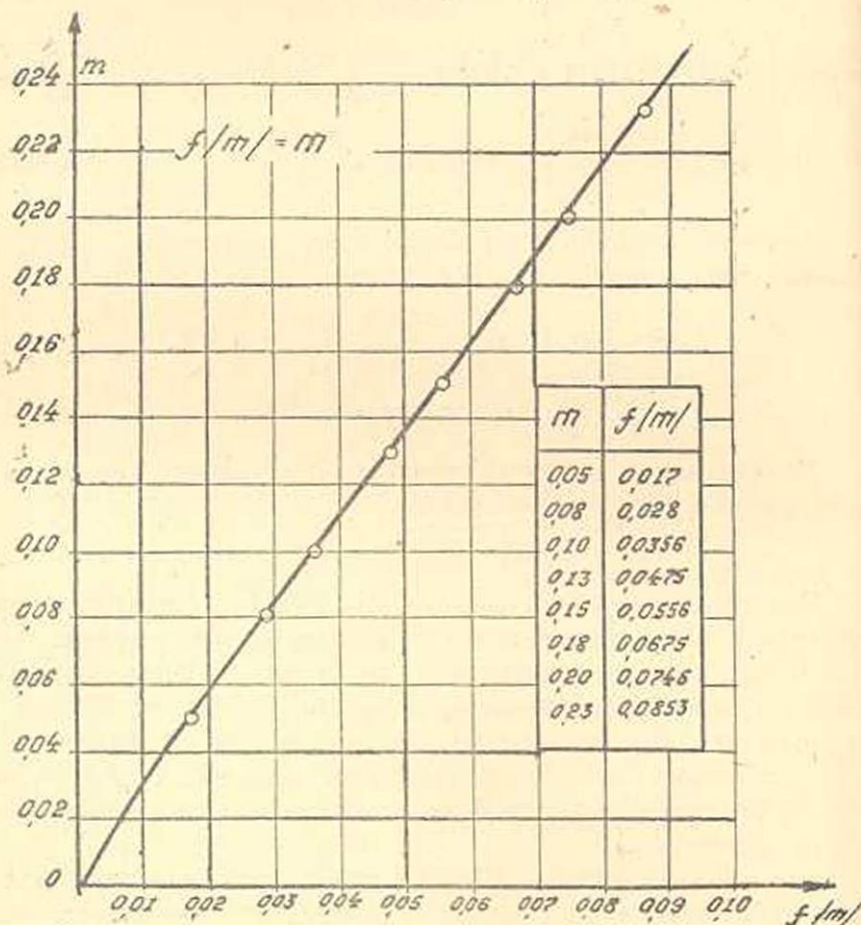


Рис. 7.

Таким образом формула (30) дает искомую аналитическую зависимость, по которой весьма просто можно определить ту длину, за пределами которой эпюры скоростей не подвержены никаким изменениям, т. е. эпюра скорости принимает свою нормальную форму. Кроме того, это уравнение подводит научную базу под критический подход к имеющимся в литературе указаниям относительно

но различных величин отношения $\frac{L}{d}$ (длины входного участка к диаметру).

Однако задача наша была бы односторонней, если бы не был затронут вопрос о величине коэффициентов дополнительных потерь на длине входного участка. Для определения этой величины принимаем в основу формулу турбулентного сопротивления [8].

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \rho \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{V^3}{2} \quad (33)$$

Согласно уравнениям (14) и (28)

$$m = \frac{V}{V_0} - 1 \quad (14)$$

$$p - p_0 = \rho \frac{V^2 - V_0^2}{2} \quad (28)$$

Уравнение (33) можно преобразовать следующим образом:

$$p_0 - p = \rho \frac{V_0^2}{2} \left[\frac{V^2}{V_0^2} - 1 \right] = \rho \frac{V_0^2}{2} [(1+m)^2 - 1] = \rho \frac{V_0^2}{2} (2m + m^2)$$

$$\text{или} \quad \frac{p_0 - p}{\rho \frac{V_0^2}{2}} = 2m + m^2 \quad (34)$$

Из уравнения (33) имеем

$$\lambda = \frac{\Delta p}{\rho \frac{V^3}{2}} \cdot \frac{d}{x_2 - x_1}$$

с учетом уравнения (34) получим

$$\lambda = \frac{2m + m^2}{x_2 - x_1} \cdot d \quad (35)$$

Из уравнения (30)

$$\text{или} \quad \frac{L_x}{r} = \frac{1}{\xi} Re^{1/4} \cdot f(m)$$

$$\frac{x_2 - x_1}{d} = \frac{1}{2\xi} Re^{1/4} \cdot f(m) \quad (36)$$

Подставляя значение $\frac{x_2 - x_1}{d}$ из уравнения (36) в уравнение (35), получим

$$\lambda = \frac{2\xi(2m + m^2)}{Re^{1/4} f(m)} \quad \text{или} \quad (37)$$

$$\lambda = \frac{A}{R_e^{1/4}} \quad (38)$$

$$\text{где} \quad A = \frac{2\xi(2m+m^2)}{l(m)} \quad (39)$$

Как видно из уравнения (38) значение коэффициента дополнительных потерь (за счет длины входного участка) обратно пропорционально числу Рейнольдса. Так и надо было ожидать, так как при больших числах Рейнольдса длина входного участка укорачивается благодаря более быстрому выравниванию эпюры скорости в сильно турбулентном потоке.

На основании вышеизложенного общий коэффициент потерь напора конфузора (рис. 4), определяется суммой двух коэффициентов

$$\xi_0 = \xi_1 + \lambda \quad \text{где}$$

ξ_1 — коэф. потерь, определяемый из уравнения Бернулли [4]

$$\xi_1 = \frac{\frac{V_1^2}{2g} + \Delta h - h_e}{\frac{V_2^2}{2g}} \quad (40)$$

Входящие в формулу (40) величины изображены на рис. 8, кроме h_e , которая определяется по формуле Шеши и равна

$$h_e = \frac{V_{cp}^2 \cdot l}{C_{cp}^2 \cdot R_{cp}}$$

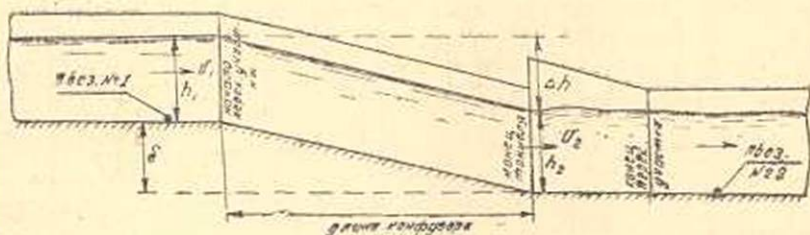


Рис. 8.

λ — коэффициент дополнительной потери напора на длине входного участка, определяемый по формуле (37).

Для исследованного в Гидроэлектрической лаборатории переходного участка деривации ГюмшГЭС имеем следующие величины

Из опытов по формуле (40) получено [4]

$$\xi_1 = 0.10$$

Дополнительный коэффициент потери по формуле (37)

$$\lambda = \frac{2\xi(2m+m^2)}{R_e^{1/4}f(m)} = \frac{2 \cdot 0,025 \cdot 0,513}{69000^{1/4} \cdot 0,0853} \approx 0,02$$

Общий коэффициент потери напора на вход по формуле (37)

$$\xi_0 = 0,10 + 0,02 = 0,12$$

Как видно, разница довольно ощутительная, так как общий коэффициент потери на вход увеличивается примерно на 20%.

Надо при этом учесть еще одно обстоятельство, что скорости в Гюмшской деривации (в туннели) довольно большие; при уменьшении этих скоростей в допустимых пределах % расхождения увеличится, так как при этом число Рейнольдса уменьшается (см. формулу 37).

Действительно, при скоростях порядка 3,5 м/сек. в натуре или 70 см/сек. на модели (масштаб модели 1/25), число Рейнольдса $R_e = 54000$ (R_e отнесено к радиусу). Тогда по формуле (37) коэффициент дополнительных потерь напора по длине входного участка будет

$$\lambda = \frac{2\xi(2m+m^2)}{R_e^{1/4}f(m)} = \frac{2 \cdot 0,025 \cdot 0,513}{54000^{1/4} \cdot 0,0853} \approx 0,023.$$

Отсюда следует, что значение коэф. дополнительных потерь увеличивается с уменьшением числа Рейнольдса и % расхождения тем больше, чем меньше значение R_e .

Для исследованных переходных участков на модели ГюмшГЭС дополнительные потери могут достигнуть 25% от потерь в конфузоре.

На основании вышеприведенных подсчетов по формулам (37) (35) и (30) и сопоставления их с опытными данными, полученными в Гидроэлектрической лаборатории*, можно сделать тот вывод, что недоучет дополнительных потерь за счет длины входного участка должен привести к недостаточно точным значениям коэффициентов потерь для переходного участка в целом. Это в конечном счете идет не в запас.

Значение коэффициента λ тем более ощутительное, чем меньше значение числа R_e .

Полученные формулы, кроме всего вышесказанного, вносят определенную ясность в имеющиеся в литературе [2,10,11,12] указания о пределах отношения $\frac{L_x}{d}$, которое принимается постоянным. Но, как видно из полученных формул, это отношение не есть величина

* Исследование переходных участков ГюмшГЭС подготавливается к печати.

постоянная, ввиду переменности L_x (длины входного участка) и зависит от числа Re .

Приведенная методика аналитического исследования по определению дополнительных потерь, дает возможность применить ее не только к задаче конфузора, но и к самым различным задачам, связанным с определением потерь напора, если они обусловлены перераспределением скоростей.

Для более наглядной иллюстрации полученных формул (36) и (37) составлены кривые (рис. 9, 10).

Из кривой (рис. 10) видно, что отношение

$$\frac{2m + m^2}{f(m)} = \frac{2m + m^2}{\frac{Lx \cdot \xi}{rRe^{1/4}}}$$

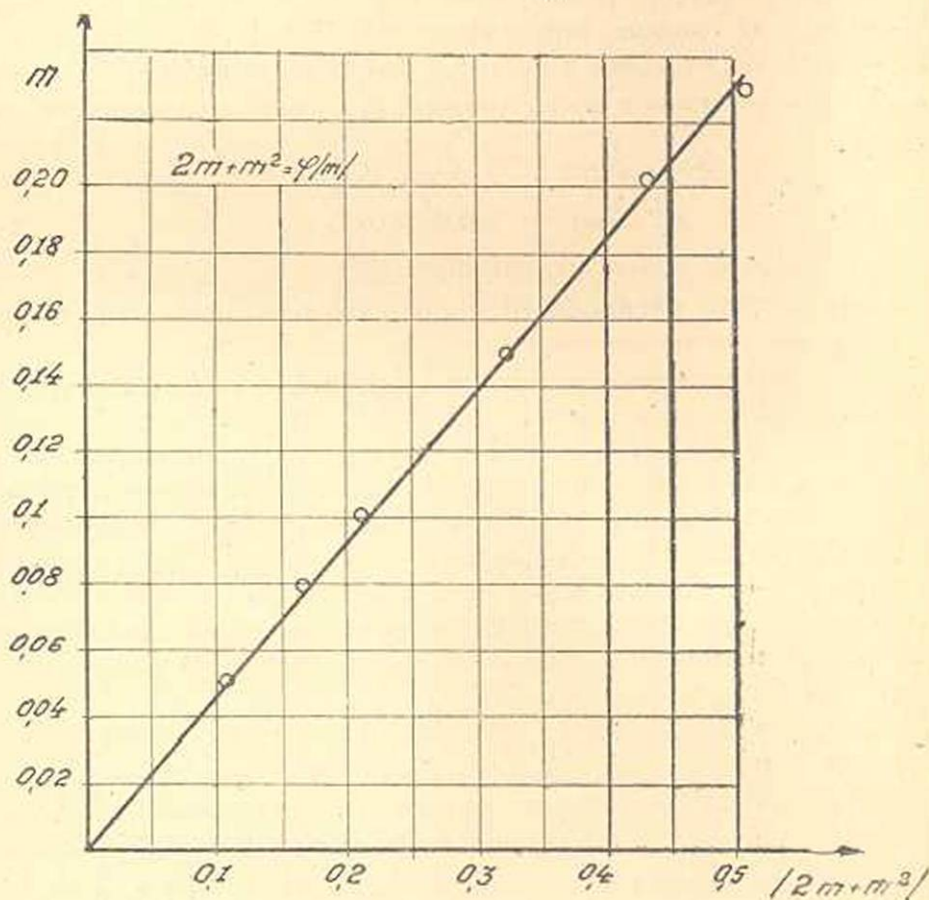


Рис. 9.

есть величина постоянная и равняется тангенсу угла, составляемого прямой АВ (рис. 10) с осью $\frac{Lx\xi}{rRe^{1/4}}$.

Выводы

1. При изменении сечения канала потери напора не ограничиваются местом сужения потока.

Потери возникают на гораздо большем протяжении (вниз по течению) и сохраняются до того места, где эпюра скоростей принимает свою окончательную „установившуюся“ форму.

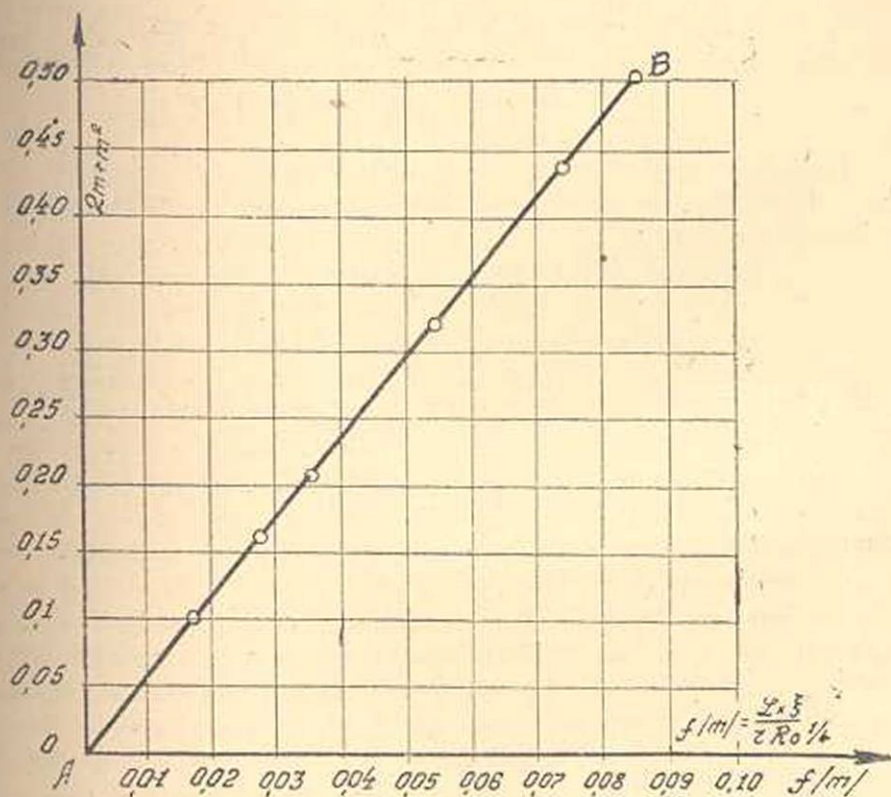


Рис. 10.

Длина дериивации, на протяжении которой изменение скоростей прекращается и устанавливается окончательная форма эпюры скоростей, называется „длиною входного участка“.

2. Причиной образования дополнительных потерь на переходном участке является главным образом перераспределение векторов скоростей, что создает дополнительные силы трения, которые должны быть оценены как потери напора на местные сопротивления.

3. Длина переходного участка (конфузора) определяется суммой двух величин: длиной конфузора, где заканчиваются изменения поперечных сечений, и длиной входного участка канала, где кончаются изменения эпюры скоростей. В соответствии с этим суммарный коэффициент потерь определяется по формуле

$$\xi_0 = \xi_1 + \lambda,$$

где

ξ_1 — коэффициент потери только в конфузоре, определяемая по формуле

$$\xi_1 = \frac{\frac{V_1^2}{2g} + \Delta h - h_e}{\frac{V_2^2}{2g}}$$

λ — коэффициент потери на длине входного участка, определяемая по формуле

$$\lambda = \frac{2\xi(2m + m^2)}{Re^{1/4} f(m)} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{2m + m^2}{L_x} \cdot d$$

4. Длина турбулентного входного участка определяется по формуле

$$L_x = \frac{rR_c^{1/4}}{\xi} f(m) = \\ = \frac{rR_c^{1/4}}{\xi} \left\{ -0,70 + 1,3 \ln(1+m) + \frac{0,95}{1+m} - 0,17 \left[\sqrt{\frac{0,31-m}{1+m}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \arcsin \frac{\sqrt{1+m}}{1,145} \right] + 0,0133 \sqrt{\frac{15}{1+m}} - 11,48 \right\};$$

значения $f(m)$ можно определить из рис. 7 или из таблицы.

Коэффициент ξ постоянен и равен 0.025.

5. Произведенные подсчеты показали, что величина λ — в основном зависит от числа Рейнольдса и может достигнуть 20–30% от потери в конфузоре. При уменьшении числа Рейнольдса величина λ увеличивается.

Гидроэлектрическая лаборатория
Водно-Энергетического Института
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 11 XI 1948.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Прандтль и Титъенс*—Гидро-и аэродинамика, Т. II, стр. 34 и 91, 1935.
2. *И. Г. Есьман*—Гидравлика, 120, 1938.
3. *Л. Шиллер*—Hydro-and aerodynamik, В. 4, 1932.
4. Отчеты по исследованию переходных участков деривации ГюмшГЭС—часть I и II. Гидроэлектрическая лаборатория (ГЭЛ) 1948.
5. *И. Г. Ханович*—Теория корабля, 240, 1939.
6. *Л. Г. Лойцянский*—Аэродинамика пограничного слоя, стр. 138, 1941.
7. *Л. Прандтль*—Результаты работ последнего времени по изучению турбулентности. Проблемы турбулентности под ред. Великанова. 1936.
8. *Б. А. Бахметев*—Механика турбулентного потока, стр. 29, 1939.
9. *Б. Н. Юрьев*—Экспериментальная аэродинамика, стр. 271, 1936.

10. Դ. Բախտեր—Гидравлика трубопроводов, стр. 140, 1936.
 11. Դաբեон—Гидравлика и ее приложения, стр. 320, 1934.
 12. Ի. Գ. Եսեման—Местные сопротивления в закрытых каналах и трубах и зависимость их от распределения скоростей в поперечном сечении, 1914.

Ա. Կ. Աճառյան

ՍԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ՇԵՐՏԻ ՏԵՍՈՒՅՅԱՆ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ԲԱՑ ԴԵՐԻՎԱՑԻԱՅԻ ԱՆՅՈՒՄԱՅԻՆ ՏԵՂԱՄԱՍԵՐՈՒՄ ՃՆՇՄԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏԸ ՈՐՈՇԵԼՈՒ ՀԱՄԱՐ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

1. Ջրանցքի կորվածքի փոփոխման ժամանակ ճնշման կորուստները չեն սահմանափակվում կորվածքի նեղացման տեղով: Կորուստներն առաջանում են ավելի մեծ տարածություն վրա (հասանքով ներքև) և առաջանում են մինչև այն տեղը, որտեղ արագությունների էպյուրան կրնա ընկնի նորմալ կայունացված ձևը:

Դերիվացիայի այն երկարությունը, որում դադարում է արագության փոփոխումը և հաստատվում է արագության էպյուրայի վերջնական ձևը, կոչվում է «մուտքի տեղամասի երկարություն»:

2. Անցման տեղամասում առաջացող լրացուցիչ կորուստների պատճառը հանդիսանում է զլխավորապես արագությունների վեկտորների վերադասումը, որն ստեղծում է շփման լրացուցիչ ուժեր և որոնք պետք է զննանալ նաև ինչպես տեղական զրմադրություններին համապատասխանող ճնշման կորուստներ:

3. Մուտքի տեղամասի երկարությունը (կոնֆուզոր) որոշվում է երկու մեծությունների գումարով՝ կոնֆուզորի երկարությամբ, որտեղ վերջանում է բնականական կորվածքի փոփոխությունը և ջրանցքի մուտքի տեղամասի երկարությամբ, որտեղ վերջանում են արագությունների էպյուրայի փոփոխությունները:

Մյուս համապատասխան լրիվ կորուստների գործակիցը կորոշվի հետևյալ բանաձևով

$$\xi_0 = \xi_1 + \lambda,$$

որտեղ ξ_1 կորուստների գործակիցն է միայն կոնֆուզորում և որոշվում է

$$\xi_1 = \frac{V_1^2}{2g} + \Delta h - h_c$$

բանաձևով,

$$\frac{V_2^2}{2g}$$

λ -ն մուտքի տեղամասի երկարությամբ առաջացող կորուստների գործակիցն է և որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\lambda = \frac{2\xi(2m+m^2)}{R_e^{1/4} f(m)} \quad \text{կամ} \quad \lambda = \frac{2m+m^2}{L_x} \cdot d$$

4. Մուտքի տեղամասի երկարությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$L_x = \frac{rR_e^{1/4}}{\xi} i(m) = \frac{rR_e^{1/4}}{\xi} \left\{ -0,70 + 1,3 \ln(1+m) + \frac{0,95}{1+m} - \right. \\ \left. - 0,17 \left[\sqrt{\frac{0,31-m}{1+m}} + \arcsin \sqrt{\frac{1+m}{1,145}} \right] + 0,0133 \sqrt{\frac{15}{1+m}} - 11,48 \right\},$$

բայց որում $\xi=0,025$, իսկ $i(m)$ արժեքը որոշում ենք 7-րդ գծագրից կամ համապատասխան աղյուսակից:

5. Կատարված հաշվումները ցույց են տալիս, որ λ -ի մեծությունը ճիմնականում կախված է Ռեյնոլդսի թվից և կարող է հասնել կոնֆուզորում եղած կորուսաների $20-30\%$ -ին: Ռեյնոլդսի թվի նվազման հետ λ -ն մեծանում է:

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Н. А. Картелишвили

Анализ колебаний масс в гидроэлектрических
 установках при набросах нагрузки

Явление колебания масс в гидроэлектрической установке математически выражается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений неустановившегося режима в напорной деривации и уравнительном резервуаре. В нелинейности этих уравнений и заключаются специфические трудности исследования колебаний масс и гидравлического расчета уравнительных резервуаров.

При полном сбросе нагрузки уравнения колебаний масс приводятся к интегрируемому виду,* что дает возможность получить вполне точное уравнение для определения амплитуды колебания горизонта воды в уравнительном резервуаре. При набросе нагрузки привести уравнения колебаний масс к интегрируемому виду принципиально невозможно, и это заставило в свое время строить расчет амплитуд колебания уровней в уравнительных резервуарах на различных приближенных допущениях. При этом в качестве существенно необходимой предпосылки принималось, что расход турбин при неустановившемся режиме не зависит от положения уровня воды в резервуаре, т. е. что он, изменившись скачком при набросе нагрузки остается далее постоянным. Однако, при известных условиях, особенно при небольших напорах, эта предпосылка может привести к существенным погрешностям.

С вопросом о влиянии увеличения расхода турбин (для поддержания постоянной мощности) при падении уровня в резервуаре на амплитуды колебания этого уровня, тесно связан вопрос об устойчивости стационарных режимов работы гидроэлектрической установки. Существование *конечной* области устойчивости в системе удовлетворяющей обычным условиям устойчивости Тома, полученным из анализа бесконечно-малых колебаний системы вокруг положения равновесия, непосредственно вытекает из теоремы Ляпунова[1] об устойчивости движения. Но охватывает ли эта конечная область весь практически возможный диапазон изменения нагрузок — этот вопрос может быть решен только в результате анализа колебаний

* В данной работе имеется в виду уравнительный резервуар цилиндрического типа.

конечной амплитуды, с учетом изменений расхода турбин в зависимости от изменений уровня воды в уравнительном резервуаре.

Попытка анализа устойчивости при колебаниях конечной амплитуды была сделана Шюллером [6]. Стремясь решить этот вопрос привычными методами теории линейных колебаний, Шюллер линеаризовал, хотя и в несколько завуалированной форме, нелинейные уравнения колебаний масс в случае, в котором эта линеаризация оказалась явно недопустимой. Полученный Шюллером результат — приблизительно удвоенное, против вытекающего из условий Тома, значение площади горизонтального сечения уравнительного резервуара — в силу этого оказался совершенно неверным, что будет ясно видно из дальнейшего.

Между тем, один из методов современной теории нелинейных колебаний, развитие которого стимулировалось, главным образом, запросами радиотехники, вполне применим также и к рассматриваемой задаче. Он дает возможность исследовать с исчерпывающей полнотой работу уравнительного резервуара при любых изменениях нагрузки станции, учтя при этом не только зависимость расхода турбин от положения уровня в резервуаре, но и особенности характеристик турбин, при чем в процессе этого анализа автоматически решается и задача об устойчивости.

Приступая к анализу колебаний масс упомянутым методом, примем следующие предположения.

1. Нагрузка станции в момент наброса изменяется скачком мгновенно и далее остается неизменной в течение всего времени протекания исследуемого неустановившегося режима.

2. Благодаря тому, что изменения напора станции, вызванные, главным образом, колебаниями горизонта в резервуаре, совершаются достаточно медленно по сравнению с периодами собственных колебаний регуляторов скорости турбин и влекут за собой столь же медленные изменения расхода в трубопроводах, можно считать, что регуляторы поддерживают мощность турбин в идеальном соответствии с электрической нагрузкой, а число их оборотов — в идеальном соответствии с номинальным,* и что гидравлический удар в трубопроводах пренебрежимо мал.**

3. Гидравлические сопротивления в трубопроводах пренебрежимо малы по сравнению с гидравлическими сопротивлениями в деривации.

4. Все турбины станции имеют одинаковую номинальную мощность и одинаковые характеристики. После наброса все турбины работают с полной нагрузкой.

* Это предположение до известной степени ограничивает область применения полученных ниже результатов [3].

** Это не относится, разумеется, к мало интересным, в рамках данной работы, явлениям в первые моменты переходного процесса.

Уравнения колебаний масс при этих предположениях напишутся так.

$$Z + h_D \left(\frac{Q_D}{Q_0} \right)^2 + \frac{L_D}{g \omega_D} \frac{dQ_D}{dt} = 0 \quad 1$$

$$H = H_0 + Z \quad 2$$

$$Q_c = Q_D - \omega_r \frac{dz}{dt} \quad 3$$

где Z — подъем горизонта в уравнительном резервуаре относительно горизонта верхнего бьефа станции.

Q_D — расход воды в деривации,

Q_c — суммарный расход воды в трубопроводах,

Q_0 — суммарный расход турбин при полной нагрузке в условиях стационарного режима,

h_D — суммарные потери напора в деривации при расходе Q_0 ,

H — напор при неустановившемся режиме,

H_0 — напор брутто, т. е. разность отметок горизонтов верхнего и нижнего бьефов станции,

ω_D — площадь сечения деривации,

L_D — ее длина,

ω_r — площадь зеркала свободной поверхности в уравнительном резервуаре,

g — ускорение силы тяжести,

t — время.

Мощность турбины N при постоянном числе оборотов (предположение 2) на основании результатов проф. Егизарова [2] может быть выражена следующей формулой:

$$N = N_0 \frac{H - H_z}{H_{\text{netto}} - H_z} \delta - N_x \quad 4$$

где N_0 — номинальная мощность машины,

$H_{\text{netto}} = H_0 - h_D$ — напор нетто при стационарном режиме и полной нагрузке,

H_x, N_x — постоянные, определяемые из универсальной характеристики турбины,

δ — некоторая функция открытия α направляющего аппарата турбины.

Предполагая, что δ и α связаны линейной зависимостью и имея в виду, что при $H = H_{\text{netto}}$ должно быть $N = N_0$, если $\alpha = 1$ и $N = 0$, если $\alpha = a$, где a — значение α при холостом ходе машины, легко найти

$$\delta = \frac{\alpha - a}{1 - a} + \frac{N_x}{N_0}$$

* Подразумеваются потери напора, исправленные на скоростной напор в основании уравнительного резервуара [3].

после чего формула 4 может быть переписана так:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{H - H_x}{H_0 - h_D - H_x} \left(\frac{x - a}{1 - a} + \frac{N_x}{N_0} \right) - \frac{N_x}{N_0} \quad 5$$

На основании анализа ряда универсальных характеристик турбин ЛМЗ, нами было установлено, что расход турбины с достаточной точностью может быть выражен следующей эмпирической формулой:

$$\frac{Q_c}{Q_0} = \alpha \left[(1-s) \sqrt{\frac{H}{H_{\text{netto}}}} + s \frac{n}{n_0} \right] \quad 6$$

где n — фактическое число оборотов машины,

n_0 — номинальное число оборотов,

s — постоянная, определяемая из универсальной характеристики.

Открытие турбины x выражается при этом отношением расхода проходящего через турбину при данном положении направляющих лопаток и при $H = H_{\text{netto}}$: $n = n_0$, к расходу Q_0 . Для турбины Пельтона $s = 0$ и формула 6 переходит в обычную формулу истечения через сопло.

Положив $n = n_0$, перепишем формулу 6 так:

$$\frac{Q_c}{Q_0} = \alpha \left[(1-s) \sqrt{\frac{H}{H_{\text{netto}}}} + s \right] \quad 7$$

В силу предположения 4, формулы 5 и 7 справедливы не только для мощности и расхода отдельной машины, но и для суммарной мощности и суммарного расхода всех турбин.

Соотношения 1, 2, 3, 5 и 7 составляют систему исходных уравнений рассматриваемой задачи.

Для удобства дальнейших выкладок введем величину:

$$y = z - h_D,$$

где y — подъем горизонта в уравнительном резервуаре над тем горизонтом в нем, который имеет место при стационарном режиме и полной нагрузке. Положим далее:

$$x = \frac{y}{z_0}; \quad \xi = \frac{H}{H_0 - h_D}; \quad u = \frac{Q_D}{Q_0}; \quad u_c = \frac{Q_c}{Q_0}; \quad \tau = \frac{1}{T_E};$$

$$\varepsilon = \frac{h_D}{z_0}; \quad \mu = \frac{Z_0}{H_0 - h_D}; \quad Z_0 = Q_0 \sqrt{\frac{L_D}{g \omega_D \omega_E}}; \quad T_E = 2\pi \sqrt{\frac{L_D \omega_E}{g \omega_D}}$$

$$p = \frac{H_x}{H_0 - h_D}; \quad m = \frac{N_x}{N_0}$$

Как известно, Z_0 и T_E — амплитуда и период колебания горизонта в резервуаре при полном сбросе нагрузки, в случае отсутствия гидравлических сопротивлений в деривации.

С помощью введенных обозначений, уравнения 1, 2, 3, 5, 7 приводятся к виду:

$$x - \varepsilon(1 - u^2) + \frac{1}{2\pi} \frac{du}{d\tau} = 0 \quad 8$$

$$\xi = 1 + \mu x \quad 9$$

$$\frac{\xi - p}{1 - p} \left(\frac{\alpha - a}{1 - a} + m \right) - m = 1 \quad 10$$

$$u_c = u - \frac{1}{2\pi} \frac{dx}{d\tau} \quad 11$$

$$u_c = \alpha[(1 - s) \sqrt{\xi} + s] \quad 12$$

при этом, в соответствии с предположением 4, в уравнении 5 было принято $N = N_0$.

Исключив α , ξ и u_c из последних четырех уравнений, получим:

$$u = \frac{1}{2\pi} \frac{dx}{d\tau} + \left\{ 1 - p + [a - m(1 - a)] \mu x \right\} \frac{(1 - s) \sqrt{1 + \mu x} + s}{1 - p + \mu x} \quad 13$$

Таким образом, задача сведена к решению уравнений 8 и 13. Метод, которым мы будем для этого пользоваться, берущий свое начало от Ван-дер-Поля, подробно обоснован в работе Крылова и Боголюбова [4]. Не излагая его здесь полностью, мы ограничимся только минимумом необходимых пояснений в процессе производства выкладок.

Этим методом решаются уравнения типа

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + \gamma^2 x + \sum_{i=1}^n \beta^i f_i \left(x : \frac{dx}{d\tau} \right) = 0, \quad 14$$

где β — так называемый малый параметр, причем решение может быть получено с точностью до членов порядка β^q , где q — любое целое положительное, заранее заданное число. При $\beta = 0$ уравнение 14 вырождается в обычное уравнение гармонических колебаний. В такое же уравнение вырождается система уравнений 8 и 13 при $\varepsilon = \mu = 0$, что наводит на мысль рассматривать в этих уравнениях ε и μ как малые параметры, аналогичные параметру β в уравнении 14. Считая пока, что ε и μ суть величины одного и того же порядка малости (практически всегда и ε и μ меньше единицы), будем производить вычисления с точностью до величин порядка ε^2 , т. е. будем сохранять в наших выкладках члены порядка малости ε и ε^2 . После получения решения мы более подробно остановимся на вопросе о его точности.

Произведя в уравнении 13 элементарное разложение второго члена правой части в степенной ряд и отбросив члены порядка малости μ^3 и выше, получим:

$$u = 1 + \frac{1}{2\pi} \frac{dx}{d\tau} - \mu Cx + \mu^2 Bx^2, \quad 15$$

где

$$C = \frac{(1-a)(1+m)}{1-p} - \frac{1-s}{2}$$

$$B = \frac{(1-a)(1+m)}{(1-p)^2} - \frac{(1-a)(1+m)(1-s)}{2(1-p)} - \frac{1-s}{2}$$

Дальше для нас будет существенным то, что величина C может быть представлена в виде:

$$C = 1 + \gamma, \quad \gamma = \frac{H_0 - h_D}{\eta_0} \left(\frac{\partial \eta}{\partial H} \right)_0,$$

где η — кпд турбины, η_0 и $\left(\frac{\partial \eta}{\partial H} \right)_0$ соответствуют значениям $N = N_0$; $H = H_0 - h_D$, причем производная берется из универсальной характеристики турбины, приведенной к номинальному числу оборотов и построенной в координатах N, H . Чтобы это доказать, рассмотрим величину:

$$\eta = \frac{N}{9,81 Q_c H} = \eta_0 \frac{N}{N_0} \frac{1}{u_c \xi}.$$

Т. к. $N = N_0 = \text{const}$, то отсюда следует, что

$$\frac{\partial \eta}{\partial \xi} = - \frac{\eta_0}{\xi u_c} \left(\frac{1}{\xi} + \frac{1}{u_c} \frac{\partial u_c}{\partial \xi} \right).$$

Но из формул 12 и 10:

$$\frac{\partial u_c}{\partial \xi} = [(1-s)\sqrt{\xi} + s] \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{1-s}{2\sqrt{\xi}}; \quad \frac{\partial x}{\partial \xi} = - \frac{(1+m)(1-p)(1-a)}{(\xi-p)^2}$$

следовательно:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \xi} = \frac{\eta_0}{\xi u_c} \left[\frac{[(1-s)\sqrt{\xi} + s]}{(\xi-p)^2} (1+m)(1-p)(1-a) - \frac{1-\xi}{2\sqrt{\xi}} - \frac{1}{\xi} \right]$$

Т. к. при $N = N_0$ и $H = H_0 - h_D$ имеем $\xi = u_c = 1$, то при этих условиях из последней формулы получается

$$\frac{\partial \eta}{\partial \xi} = \eta_0 (C-1),$$

откуда сразу вытекает приведенное выше выражение величины C . Подставляя u из уравнения 15 в уравнение 8, будем иметь:

$$\ddot{x} + 4\pi^2 x + 2\pi(2\varepsilon - \mu C) \dot{x} + \varepsilon \dot{x}^2 -$$

$$- 4\pi\mu[(\varepsilon C - \mu B) x \dot{x} + 2\pi \varepsilon C x] = 0,$$

Чтобы привести это уравнение к виду 14, положим $\mu = k\varepsilon$ и перепишем его так:

$$\ddot{x} + 4\pi^2 x + \varepsilon f_1(\dot{x}) + \varepsilon^2 f_2(x; \dot{x}) = 0, \quad 17$$

где

$$f_1(\dot{x}) = 2\pi(2 - kC)\dot{x} + \dot{x}^2 \quad 18$$

$$f_2(x; \dot{x}) = -4\pi k[(C - kB)x\dot{x} + 2\pi Cx] \quad 19$$

Используемый нами метод предполагает отыскание решения уравнения 17 в виде периодической функции периода 2π :

$$x = v(\phi; a) \quad 20$$

некоторого аргумента ϕ , причем:

$$\frac{da}{d\tau} = A(a) \quad \frac{d\phi}{d\tau} = \omega(a) \quad 21$$

Подставив x из 20 в 17 и используя при этом соотношения 21, приходим к следующему результату:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 v}{\partial \phi^2} \omega^2 + 2 \frac{\partial^2 v}{\partial \phi \partial a} \omega A + \frac{\partial^2 v}{\partial a^2} A^2 + \frac{\partial v}{\partial \phi} \frac{\partial \omega}{\partial a} A + \frac{\partial v}{\partial a} \frac{\partial A}{\partial a} A + \\ & + 4\pi^2 v + \varepsilon f_1 \left(\frac{\partial v}{\partial \phi} \omega + \frac{\partial v}{\partial a} A \right) + \varepsilon^2 f_2 \left(v, \frac{\partial v}{\partial \phi} \omega + \frac{\partial v}{\partial a} A \right) = 0 \end{aligned} \quad 22$$

Отыскивая выражение v с точностью до величин порядка ε^3 , положим:

$$v = v_0(\phi; a) + \varepsilon v_1(\phi_1; a) + \varepsilon^2 v_2(\phi_2; a) \quad 23$$

$$A = \varepsilon A_1(a) + \varepsilon^2 A_2(a) \quad 24$$

$$\omega = 2\pi + \varepsilon \omega_1(a) + \varepsilon^2 \omega_2(a) \quad 25$$

где v_0 , v_1 , v_2 суть периодические функции ϕ периода 2π . Подставив эти значения v , A и ω в уравнение 22, расположив результат по степеням ε и приравняв нулю коэффициент при каждой степени, получим следующую систему уравнений для определения последовательных приближений v_0 , v_1 , v_2 :

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi^2} + v_0 = 0 \quad 26$$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial \phi^2} + v_1 = \frac{\omega_1}{\pi} \frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi^2} - \frac{A_1}{\pi} \frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi \partial a} - (2 - kC) \frac{\partial v_0}{\partial \phi} - \left(\frac{\partial v_0}{\partial \phi} \right)^2 \quad 27$$

$$\frac{\partial^2 v_2}{\partial \phi^2} + v_2 = \frac{\omega_1}{\pi} \frac{\partial^2 v_1}{\partial \phi^2} - \frac{\omega_1}{4\pi^2} \frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi^2} - \frac{\omega_2}{\pi} \frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi^2} - \frac{A_1}{\pi} \frac{\partial^2 v_1}{\partial \phi \partial a} -$$

$$- \frac{\omega_1 A_1}{2\pi^2} \frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi \partial a} - \frac{A_2}{\pi} \frac{\partial^2 v_0}{\partial \phi \partial a} - \frac{A_1}{4\pi^2} \frac{\partial \omega_1}{\partial a} \frac{\partial v_0}{\partial \phi} - \frac{A_1^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2 v_0}{\partial a^2} -$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{A_1}{4\pi} \frac{\partial A_1}{\partial a} \frac{\partial v_0}{\partial a} - (2 - kC) \left(\frac{\partial v_1}{\partial \psi} + \frac{\omega_1}{2\pi} \frac{\partial v_0}{\partial \psi} + \frac{A_1}{2\pi} \frac{\partial v_0}{\partial a} \right) - 2 \frac{\partial v_0}{\partial \psi} \frac{\partial v_1}{\partial \psi} - \\
& - \frac{\omega_1}{\pi} \left(\frac{\partial v_0}{\partial \psi} \right)^2 - \frac{A_1}{\pi} \frac{\partial v_0}{\partial \psi} \frac{\partial v_0}{\partial a} + 2k(C - kB)v_0 \frac{\partial v_0}{\partial \psi} + 2kCv_0
\end{aligned} \quad 28$$

Из уравнения 26:

$$v_0 = a \sin \psi \quad 29$$

В качестве v_0 можно было бы взять и другое частное решение уравнения 26, напр. $v_0 = a \cos \psi$, но приравняв произвольной постоянной в этом решении величине a лежит в существе метода. Подставив v_0 из 29 в 27, получим:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial \psi^2} + v_1 = -\frac{a^2}{2} - \left[(2 - kC)a + \frac{A_1}{\pi} \right] \cos \psi - \frac{a^2}{2} \cos 2\psi + \frac{a\omega_1}{\pi} \sin \psi \quad 30$$

Правая часть уравнения 30 не должна содержать первой гармоники, т. к. в противном случае в выражении v_1 появляется секулярный член и решение становится неперiodическим. Исходя из этого следует приравнять нулю коэффициенты при $\cos \psi$ и $\sin \psi$, в результате чего получим:

$$A_1 = -\pi(2 - kC)a \quad \omega_1 = 0 \quad 31$$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial \psi^2} + v_1 = -\frac{a^2}{2} (1 + \cos 2\psi) \quad 32$$

Из уравнения 32:

$$v_1 = -\frac{a^2}{2} - \frac{a^2}{6} \cos 2\psi \quad 33$$

Подставляя значения v_0 , v_1 , A_1 и ω_1 в уравнение 28, будем иметь:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 v_2}{\partial \psi^2} + v_2 = -\frac{A_2}{\pi} \cos \psi + \left[\frac{\omega_2}{\pi} + \left(\frac{2 + kC}{2} \right)^2 + \frac{a^2}{3} \right] a \sin \psi + \\
& + \left(\frac{1}{3} + \frac{5}{6} kC - kB \right) a^2 \sin 2\psi + \frac{a^3}{3} \sin 3\psi
\end{aligned} \quad 34$$

По условию периодичности v_2 , т. е. по условию отсутствия секулярных членов в решении уравнения 34, опять-таки необходимо приравнять нулю коэффициенты при $\cos \psi$ и $\sin \psi$, в результате чего найдем:

$$A_2 = 0 \quad \omega_2 = -\pi \left[\left(\frac{2 + kC}{2} \right)^2 + \frac{a^2}{3} \right] \quad 35$$

$$v_2 = -\frac{1}{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{5}{6} kC - kB \right) a^2 \sin 2\psi - \frac{a^3}{24} \sin 3\psi \quad 36$$

На основании формул 20, 21, 23, 24 и 25 теперь можно написать:

$$x = -\frac{\varepsilon a^2}{2} + \frac{\varepsilon a^2}{6} \cos 2\psi + a \sin \psi - \frac{1}{3} \left(\frac{\varepsilon^2}{3} + \frac{5}{6} \varepsilon \mu C - \mu^2 B \right) a^2 \sin 2\psi - \frac{\varepsilon^2 a^2}{24} \sin 3\psi \quad 37$$

$$\frac{da}{d\tau} = -\pi(2\varepsilon - \mu C)a \quad 38$$

$$\frac{d\psi}{d\tau} = \pi \left[2 - \left(\frac{2\varepsilon + \mu C}{2} \right)^2 - \frac{\varepsilon^2 a^2}{3} \right] \quad 39$$

Из уравнения 37, используя уравнения 38 и 39, легко найти также выражение для производной:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi} \frac{dx}{d\tau} &= \varepsilon(2\varepsilon - \mu C)a^2 + \left[2 - \frac{2\varepsilon + \mu C}{2} - \frac{\varepsilon a^2}{3} \right] a \cos \psi - \\ &- \frac{1}{3} \left(\frac{10}{3} \varepsilon^2 + \frac{7}{3} \varepsilon \mu C - 4\mu^2 B \right) a \cos 2\psi - \frac{\varepsilon a^2}{4} \cos 3\psi - \\ &- (2\varepsilon - \mu C)a \sin \psi - \frac{2}{3} \varepsilon a^2 \sin 2\psi \end{aligned} \quad 40$$

Проинтегрировав уравнение 38, получим:

$$a = a_0 e^{-\pi(2\varepsilon - \mu C)\tau} \quad 41$$

где a_0 — значение величины a при $\tau = 0$. Далее, из уравнений 39 и 41 находим:

$$\psi = \pi \left[2 - \left(\frac{2\varepsilon + \mu C}{2} \right)^2 \right] \tau + \frac{\varepsilon^2 a_0^2}{6(2\varepsilon - \mu C)} \left[1 - e^{-2\pi(2\varepsilon - \mu C)\tau} \right] + \psi_0 \quad 42$$

где ψ_0 — значение ψ при $\tau = 0$.

Из уравнений 37, 41 и 42 сразу видно, что независимо от начальных условий, т. е. от значений a_0 и ψ_0 , условием затухания колебаний, т. е. условием устойчивости системы является условие $2\varepsilon - \mu C > 0$, которое после подстановки значений ε , μ и C записывается так:

$$\omega_E > \frac{LQ^2 (1 + \gamma)}{2g\omega_D h_D (H_0 - h_D)} \quad 43$$

Это условие полностью совпадает с обычными формулами расчета устойчивости уравнительных резервуаров, выводимыми из анализа бесконечно малых колебаний системы вокруг стационарного состояния (написанными без учета потерь напора в трубопроводах). Следовательно, если система устойчива при бесконечно малых колебаниях, то она будет устойчива и при любых конечных изменениях нагрузки.

Перейдем теперь к определению величин a_0 и ϕ_0 , играющих роль произвольных постоянных в общем интеграле уравнения 16, выраженном формулами 37, 41 и 42. Если относительный расход турбин до наброса нагрузки был равен $u_0 = n < 1$, то такой же расход протекал при этом в деривации. Стационарный уровень воды в резервуаре до наброса нагрузки определяется величиной

$$x = x_0 = \varepsilon(1 - n^2),$$

как это следует из уравнения 8. В момент непосредственно следующий за набросом нагрузки уровень в резервуаре и расход в деривации остаются прежними: $\dot{x} = x_0$; $u = u_0 = n$. Подставив эти значения x и u в уравнение 15, придем к следующим начальным условиям:

$$\tau = 0, x = \varepsilon(1 - n^2), \frac{1}{\pi} \frac{dx}{d\tau} = -2(1 - n) + 2\varepsilon\mu C(1 - n^2) \quad 44$$

Из этих начальных условий и уравнений 37, 41 и 42 легко усмотреть, что при $\varepsilon = \mu = 0$ имеем $a_0 = -(1 - n)$, $\phi_0 = 0$. Если же $\varepsilon \neq 0$; $\mu \neq 0$, то должно быть $a_0 = -(1 - n) + \beta$; $\phi_0 \neq 0$, причем β и ϕ суть величины не большие, чем порядка малости ε . Учитывая это, положив в уравнение 40 $\tau = 0$, $a = a_0$, $\phi = \phi_0$ и используя второе из условий 44, получим:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{22}{9} - \frac{37}{18}n + \frac{7}{12}n^2 \right) \varepsilon^2 - \left(\frac{25}{9} + \frac{2}{9}n \right) \varepsilon\mu C + \frac{2\beta}{1-n} + \phi_0^2 + \\ & + \left[\left(\frac{2}{3} + \frac{3}{4}n \right) \varepsilon - \mu C \right] \phi_0 + \left[\frac{C^2}{4} + \frac{4}{3}(1-n)B \right] \mu^2 = 0 \end{aligned} \quad 45$$

откуда видно, что β есть величина порядка малости ε^2 . Тогда из уравнения 37 и первого из условий 44 сразу получается:

$$\phi_0 = -\frac{2}{3}(2 + n)\varepsilon \quad 46$$

Из уравнений же 45 и 46 имеем:

$$\begin{aligned} \beta = & -(1 - n) \left(\frac{5}{3} - \frac{5}{4}n + \frac{5}{72}n^2 \right) \varepsilon^2 + (1 - n) \left(\frac{13}{18} - \frac{2}{3}n \right) \varepsilon\mu C - \\ & - (1 - n) \left[\frac{C^2}{8} + \frac{2}{3}(1 - n)B \right] \mu^2 \end{aligned} \quad 47$$

Таким образом, зависимость горизонта в уравнительном резервуаре от времени определена полностью. Практический интерес представляет, однако, только наинизшее положение уровня, т.е. первая амплитуда колебания. Как известно, при $\varepsilon = \mu = 0$ горизонт в резервуаре достигает минимума в момент $\tau_m = \frac{1}{4}$. При $\varepsilon \neq 0$, $\mu \neq 0$,

$$\text{положим} \quad \tau_m = \frac{1}{4} + \lambda, \quad 48$$

при этом очевидно, что λ есть величина порядка малости ε^2 . Подставляя это значение τ_m в уравнение 41, получим значение $a = a_m$ в момент $\tau = \tau_m$ с точностью до величин порядка малости ε^3 :

$$a_m = -(1-n) + \pi \frac{1-n}{4} (2\varepsilon - \mu C) + \pi (1-n)(2\varepsilon - \mu C)\lambda - \\ - \pi^2 \frac{1-n}{32} (2\varepsilon - \mu C)^2 + \beta \quad 49$$

Далее из уравнения 42, замечая, что

$$1 - 1 - 2\pi (2\varepsilon - \mu C)\tau < 2\pi (2\varepsilon - \mu C)\tau,$$

имеем при $\tau = \tau_m$:

$$\psi_m = \frac{\pi}{2} + 2\pi\lambda + \psi_0 + \rho,$$

где ρ есть величина порядка малости ε^2 , следовательно:

$$\sin\psi_m = \cos(2\pi\lambda + \psi_0 + \rho) = 1 - \frac{(2\pi\lambda + \psi_0)^2}{2} \\ \sin 2\psi_m = -\sin(4\pi\lambda + 2\psi_0 + 2\rho) = -2(2\pi\lambda + \psi_0 + \rho) \\ \sin 3\psi_m = -\cos(6\pi\lambda + 3\psi_0 + 3\rho) = -1 + \frac{9}{2} (2\pi\lambda + \psi_0)^2 \\ \cos 2\psi_m = -\cos(4\pi\lambda + 2\psi_0 + 2\rho) = -1 + 2(2\pi\lambda + \psi_0)^2$$

Подставив эти значения тригонометрических функций и величину a_m из 49 в уравнение 37, получим:

$$x = -(1-n) - \frac{2}{3} (1-n)^2 \varepsilon + \pi \frac{1-n}{4} (2\varepsilon - \mu C) + \pi \frac{(1-n)^2}{3} \varepsilon (2\varepsilon - \mu C) - \\ - \pi^2 \frac{1-n}{32} (2\varepsilon - \mu C)^2 - (1-n) \left(\frac{5}{3} - \frac{5}{4} n + \frac{5}{72} n^2 \right) \varepsilon^2 - \frac{(1-n)^2}{24} \varepsilon^2 + \\ + (1-n) \left(\frac{13}{18} - \frac{2}{9} n \right) \varepsilon \mu C - (1-n) \left[\frac{C^2}{8} + \frac{2}{3} (1-n) B \right] \mu^2 + \\ + \pi (1-n)(2\varepsilon - \mu C)\lambda + \frac{1-n}{2} (2\pi\lambda + \psi_0)^2 \quad 50$$

Приравняв нулю $\frac{dx}{d\tau}$, найдем то значение λ , при котором x достигает минимума:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\varepsilon}{3} (1 + 2n) + \mu C \right] \quad 51$$

* Для определения последующих экстремумов такой прием, разумеется, неприменим.

Подставив это значение λ в уравнение 50, после элементарных преобразований получим величину первой амплитуды:

$$x_m = -(1-n) \left\{ 1 - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2}{3} + \frac{2}{3}n \right) \varepsilon + \frac{\pi}{4} \mu C + \right. \\ + \left[\frac{25}{24} + \frac{\pi^2}{8} - \frac{2\pi}{3} + \left(\frac{2\pi}{3} - 2 \right) n + \frac{n}{9} \right] \varepsilon^2 - \left[\frac{4}{3} + \frac{\pi^2}{8} - \frac{\pi}{3} + \right. \\ \left. + \left(\frac{\pi}{3} - \frac{5}{9} \right) n \right] \varepsilon \mu C + \left[\left(\frac{1}{4} + \frac{\pi^2}{32} \right) C^2 + \frac{2}{3} (1-n) B \right] \mu^2 \left. \right\} \quad 52$$

В расчетах более удобно, однако, отсчитывать амплитуду от статического горизонта системы, т. е. от горизонта верхнего бьефа станции; другими словами, вместо величины $x_m = \frac{y_m}{Z_0}$ рассматривать величину $\frac{Z_m}{Z_0} = \frac{y_m - h_D}{Z_0} = x_m - \varepsilon$, абсолютное значение которой обозначим через Z_m . Это последнее, на основании формулы 52, выразится так:

$$Z_m = (1-n) + F_1(n)\varepsilon + \frac{\pi}{4} (1-n)\mu C + F_2(n)\varepsilon^2 - \\ - F_3(n) \varepsilon \mu C + (1-n) \left[\frac{1}{y} \left(1 + \frac{\pi^2}{8} \right) C^2 + \frac{2}{3} (1-n) B \right] \mu^2$$

где

$$F_1(n) = \frac{5}{3} - \frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4}{3} \right) n + \frac{2}{3} n^2 = \\ = 0,096 + 0,238 n + 0,667 n^2$$

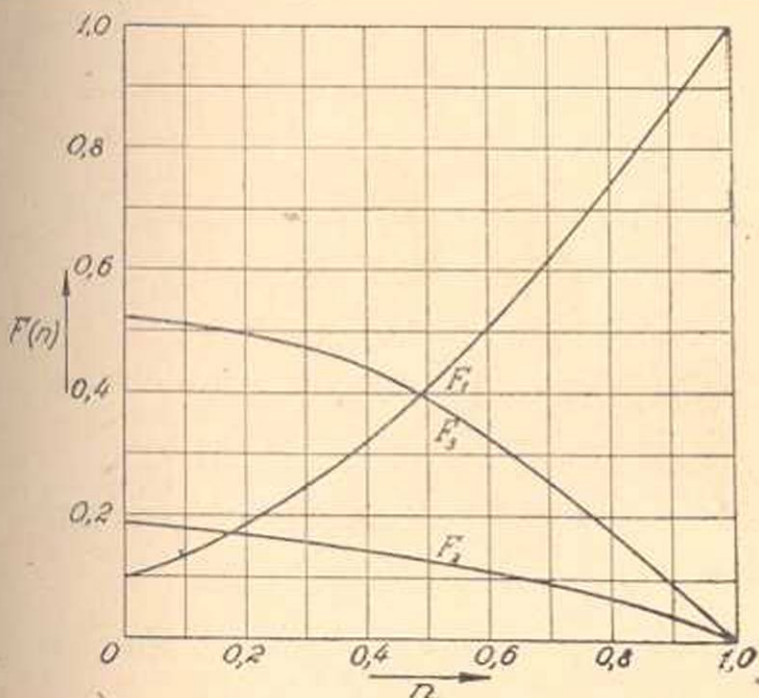
$$F_2(n) = (1-n) \left[\frac{25}{24} + \frac{\pi^2}{8} - \frac{2\pi}{3} + \left(\frac{2\pi}{3} - 2 \right) n + \frac{n^2}{9} \right] = \\ = (1-n) (0,181 + 0,094 n + 0,114 n^2)$$

$$F_3(n) = (1-n) \left[\frac{4}{3} + \frac{\pi^2}{8} - \frac{\pi}{3} + \left(\frac{\pi}{3} - \frac{5}{9} \right) n \right] = \\ = (1-n) (0,520 + 0,491 n)$$

Графики этих функций даны на фиг. 1.

Формула 53 и есть искомая расчетная формула для определения нижнего горизонта воды в уравнительном резервуаре. При выводе ее мы предполагали, что величины ε и μ суть величины одинакового порядка малости. Если в действительности это окажется не так, то очевидно, что полученная формула будет давать погрешность порядка куба большей из величин ε и μ .

Как мы уже указывали, формулы других авторов выведены в предположении, что расход турбин не зависит от положения горизонта в резервуаре, что справедливо при больших напорах, когда можно считать $\mu = 0$. Те из указанных формул, которые выведены



Фиг. 1.

теоретически, с теми или иными произвольными допущениями, не представляют в данном случае интереса. Среди же эмпирических формул одной из наиболее точных является эмпирическая формула Фогта-Акснеса [5], полученная в результате обработки данных численного интегрирования уравнений колебания масс. Эта формула, принятая действующими расчетными нормами, в наших обозначениях пишется так:

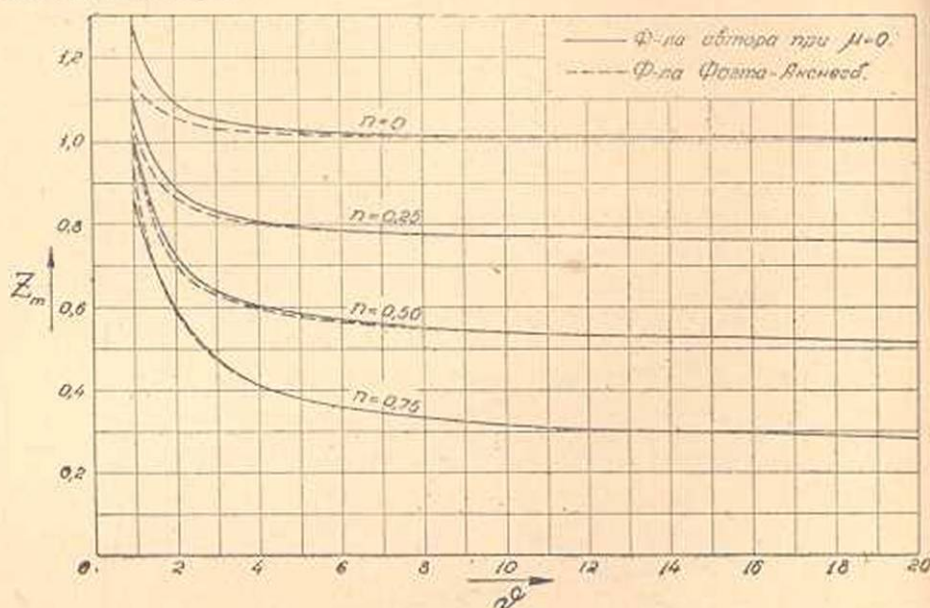
$$Z_m = \varepsilon + (1-n)(1-p\varepsilon^{1,3})(\sqrt{1-0,275\varepsilon^3\sqrt{n}} + 0,05\varepsilon^2 - 0,9\varepsilon) \quad 54$$

Формула же 53 при $\mu = 0$ приобретает вид:

$$Z_m = 1 - n + F_1(n)\varepsilon + F_2(n)\varepsilon^2 \quad 55$$

На фиг. 2 даны кривые зависимости Z_m от $\vartheta = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{z_0}{h_D}$ и n по формулам 54 (пунктир) и 55 (сплошные линии). Если учесть, что случай $n=0$ не может иметь места на практике (т. к. даже в исключительно редком случае наличия только одной машины следует считаться с расходом холостого хода) и что значения $\vartheta < 3$ могут встретиться только в виде исключения, следует констатировать практически полное совпадение результатов, даваемых формулами

54 и 55. Это говорит о том, что формула 55, а значит и 53, дает точность, равную точности численного интегрирования, т. е. более чем достаточную.



фиг. 2.

В практике проектирования приходится обычно по заданной амплитуде отыскивать площадь сечения резервуара. Для этой цели формулу 53 удобнее преобразовать, положив

$$Z_m = Y_m \frac{1}{\beta}; \quad \mu = \beta^3; \quad Y_m = \frac{z_m}{h_D}; \quad \beta = \frac{h_D}{H_0 - h_D},$$

после чего она принимает вид:

$$Y_m = (1-n)\beta + F_1(n) + 0,785(1-n)\beta^3 C + \frac{F_2(n)}{\beta^3} - F_3(n)\beta^3 C + (1-n) \left[0,558 C' + \frac{2}{3} (1-n) B \right] \beta^3 \quad 56$$

Площадь сечения резервуара входит здесь только в параметр β (через величину z_0).

Гидроэлектрическая лаборатория
Водно-Энергетического Института,
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 3 XII 1948.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А. Ляпунов.—Общая задача об устойчивости движения. Харьков, 1892.
2. И. В. Егизаров.—Гидроэлектрические силовые установки. Часть 1. Ленинград-Москва, 1934.

3. Н. А. Карпелишвили.—Об устойчивости гидроэлектрических установок, снабженных уравнительными башнями. Изв. АН Армянской ССР. № 5, 1947.
4. Н. М. Крылов, и Н. И. Боголюбов.—Введение в нелинейную механику. Киев, 1937.
5. F. Vogt—Berechnung und Construction des Wasserschlosses. Stuttgart, 1923.
6. J. Schüller—Das Stabilitätskriterium für gedämpfte Wasserschlässe bei Belastungsstörungen mit endlichen Schwingungsweiten. Wasserkraft und Wasserwirtschaft. № 22, 1928.

Ն. Ա. Գաբրիելյանի

ՀԻՊՈԷԼԵՏՏԻԿ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐՈՒՄ ՋՐԻ ՄԱՍՍԱՅԻ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԱՆԱԼԻԶԸ ԲԵՌՏԱԼՈՒ ԴԵՊՖՈՒՄ

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Հոգաձուժ քննարկվում են ճնշումով դերվացիայի և հալասարակչող աշտարակի մեջ ջրի մասսայի տատանումները, որոնք առաջ են գալիս վերջավոր մեծություն ընդ ապու գեպում: Այդ տատանումների անալիզում կիրառվում է ան-դեր-Պոլի մեթոդը, հեղինակը պույց է ապիս, որ վերջավոր ամպլիտուդով տատանումների դեպքում հալասարակչող աշտարակի մեջ կայունության պայմանները համընկնում են անվերջ փոքր տատանումների համար Թումայի հայտնի պայմանին: Օգտվելով նույն մեթոդով, հեղինակը դուրս է բերում հալասարակչող աշտարակում ընդ ապու գեպում ջրի մակարդակի տատանման ամպլիտուդը որոշելու բանաձև: Ի տարբերություն մինչ այժմ եղած բանաձևերի, հեղինակի բանաձևով հաշվի է առնվում տարրիներին ելքի ավելացումն աշտարակում՝ ջրի մակարդակն իջեցնելիս և կայանի ագրեգատների օգտակար զործողության գործակցի փոփոխումը՝ ճնշումները փոփոխելիս:

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Н. А. Картвелишвили

К вопросу о законе регулирования
гидравлических турбин

Закон регулирования гидравлической турбины, то есть форма зависимости, согласно которой изменяется с течением времени величина открытия направляющего аппарата турбины при ее регулировании в случае аварийного сброса или наброса нагрузки, имеет существенное значение для расчета временной неравномерности регулирования и гидравлического удара в трубопроводе, питающем турбину.

В подавляющем большинстве работ по этим вопросам указанная зависимость принимается линейной и считается, что время регулирования, то есть время, затрачиваемое на перемещение регулирующих органов турбины из положения, имевшего место при нагрузке до аварии в положение, соответствующее нагрузке, устанавливающейся после аварии, пропорционально величине изменения нагрузки. Между тем, линейный закон регулирования имеет место только при наличии строго определенных и далеко не всегда встречающихся условий.

Форма закона регулирования зависит от соотношений между параметрами регулятора скорости турбины и, в первую очередь, от соотношений между величинами, входящими в уравнение сервомотора.

Нами [1] был дан вывод уравнения сервомотора с учетом всех его нелинейностей. Однако, в этом выводе были допущены некоторые неточности в части учета гидравлических сопротивлений в масляной системе регулятора. В выводе, который дается ниже, эти неточности устранены.

Равнодействующая P сил давления масла на поршень сервомотора уравновешивается (если не учитывать незначительной инерции поршня и других движущихся деталей) сопротивлением R , оказываемым направляющим аппаратом турбины при повороте лопаток. Рассматривая обыкновенный (не дифференциальный) сервомотор, давления p_1 и p_2 по разные стороны его поршня можно выразить так:

$$p_1 = p_0 - \gamma \frac{v^2}{2g}, \quad p_2 = \gamma \frac{v^2}{2g}$$

или так:

$$p_1 = p_0 - \gamma \frac{v^2}{2g}, \quad p_2 = p_0 - \gamma \frac{v^2}{2g}$$

в зависимости от того, какая из полостей цилиндра сервомотора, при данном положении золотниковой иглы, сообщается с масловоздушным котлом регулятора, и какая — с масляным резервуаром. В этих формулах

p_0 — давление в масловоздушном котле,

γ — объемный вес масла,

ζ — коэффициент сопротивления масляной системы регулятора

v — скорость течения масла в маслопроводах, приведенная к площади окон золотника.

Учитывая, что $P = F_s (p_1 - p_2)$, где F_s — площадь поршня сервомотора, можно написать

$$p_1 F_s - 2\gamma \zeta F_s \frac{v^2}{2g} = \pm R \quad 1$$

Скорость v можно выразить через скорость перемещения поршня сервомотора

$$v = \frac{F_s}{F_c} \frac{dz_s}{dt} \quad 2$$

где t — время, z_s — ход поршня, а F_c — площадь окон золотника (только верхних, или только нижних). Для определенности будем считать, что z_s отсчитывается от того положения, которое занимает поршень сервомотора, когда направляющий аппарат турбины полностью закрыт.

Коэффициент сопротивления ζ может быть выражен суммой

$$\zeta = \zeta_r + \zeta_m + \zeta_c \quad 3$$

в которой ζ_r учитывает потери на трение в маслопроводе, ζ_m — потери на местные сопротивления в маслопроводе и ζ_c — потери в золотнике. Как было показано в работе Аркина [2],

$$\zeta_c = \zeta' + \left(\frac{F_r}{\varepsilon \Delta F_c} \right)^2 \zeta_r + \left(\frac{F_r}{\varepsilon \Delta F_c} - 1 \right)^2 \quad 4$$

где первым членом учитываются потери на трение в стакане золотника, вторым членом — потери на трение в окнах золотника и третьим членом — потери на расширение струи масла при выходе из окон золотника. В формуле 4

F_r — площадь сечения маслопровода,

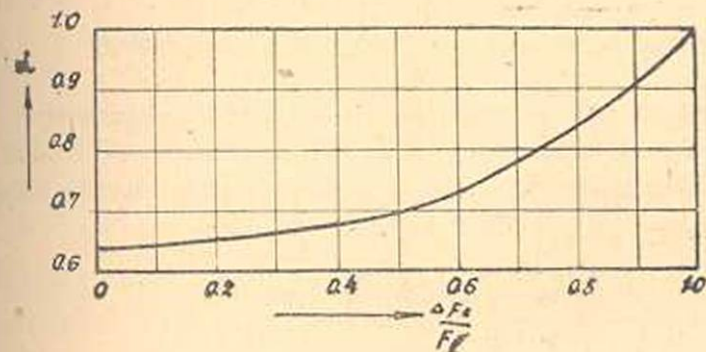
ε — коэффициент сжатия струи масла в окнах золотника,

ΔF_c — площадь открытой части окон.

Аркиным было установлено, что второй член правой части уравнения 4 пренебрежимо мал и может быть отброшен, а коэффи-

коэффициент ε может быть принят таким же, как для воды, по данным опытов Вейсбаха. На фиг. 1 дана кривая зависимости между ε и отношением $\frac{\Delta F_c}{F_l}$, где F_l — площадь сечения стакана золотника за вычетом площади сечения иглы, построенная Аркиным на основании указанных опытов.

Таким образом



Фиг. 1

$$\zeta = \zeta_T + \zeta' + \zeta_0 + \left(\frac{F_T}{\varepsilon \Delta F_c} - 1 \right)^2 \quad 5$$

здесь $\zeta_m = \text{const}$. Величины ζ_T и ζ' постоянны при турбулентном движении масла и обратно пропорциональны скорости его течения при ламинарном движении. Так как движение в маслопроводах всегда неустановившееся, при котором, как следует полагать, диапазон чисел Рейнольдса, соответствующий ламинарному режиму значительно уже, чем при установившемся движении, то мы будем считать движение турбулентным; примем, что

$$\zeta_T + \zeta' + \zeta_0 = \zeta_0 = \text{const},$$

и учитывая, что для прямоугольных золотниковых окон $\Delta F_c = b(z_c)$, где b — суммарная ширина окон, а z_c — перемещение золотниковой иглы, перепишем уравнение 5 окончательно так:

$$\zeta = \zeta_0 + \left[\frac{\kappa_1}{|x_c| \varepsilon (\kappa_2 |x_c|)} - 1 \right]^2 \quad 6$$

где

$$x_c = \frac{z_c}{h_c}, \quad \kappa_1 = \frac{F_T}{F_c}, \quad \kappa_2 = \frac{F_c}{F_l}$$

а h_c — высота окон.

Подставляя в уравнение 1 значения v и ζ из формул 2 и 6, получим:

$$T'_s \frac{dx_s}{dt} = \varphi(x_c) \sqrt{1 + \frac{R}{p_0 F_s}} \quad 7$$

где

$$x_s = \frac{z_s}{z_{s*}}, \quad T'_s = \frac{F_s Z_{s*}}{F_c} \sqrt{\frac{\gamma}{g\rho_0}}$$

$$\varphi(x_c) = \frac{x_c \varepsilon(k_2 | x_c |)}{\sqrt{z_{s0}^2 x_c^2 [\varepsilon(k_1 | x_c |)]^2 + [k_1 - |x_c| \varepsilon(k_2 | x_c |)]^2}} \quad 8$$

При этом очевидно, что в формуле 8 нужно принимать $\varepsilon(k_2 | x_c |) = 1$ при $k_2 |x_c| \geq 1$ и $\varphi(x_c) = \pm \varphi(1)$ при $|x_c| > 1$, то есть когда окна золотника полностью открыты. Здесь z_{s*} — полный ход поршня сервомотора.

Ряд подсчетов, на которых мы не будем останавливаться, показывает, что функция $\varphi(x_c)$ при $|x_c| \ll 1$ очень мало отличается от линейной функции $\varphi(x_c) = \varphi(1)x_c$. Поэтому, уравнение 7 можно переписать так:

$$T_s \frac{dx_s}{dt} = x_c \sqrt{1 + \frac{R}{\rho_0 F_s}} \quad \text{при } |x_c| \leq 1 \quad 9'$$

$$T_s \frac{dx_s}{dt} = \pm \sqrt{1 + \frac{R}{\rho_0 F_s}} \quad \text{при } |x_c| > 1 \quad 9''$$

причем $T_s = T'_s / \varphi(1)$. Знак в подкоренных выражениях в этих формулах определяется, исходя из того, что подкоренное выражение должно быть больше единицы, если действие воды на лопатку способствует ее перемещению при данном направлении движения поршня сервомотора, и меньше единицы — в противном случае.

Как было показано в нашей работе [1],

$$R = M \frac{d\beta}{dx_s} \quad 10$$

где β — угол поворота направляющих лопаток, а M — суммарный момент, необходимый для поворота всех лопаток, определяемый по формуле

$$M = \frac{\gamma Q^2}{gS} D \delta_1 \pm \frac{1}{2} \text{fd} \sqrt{\left[\gamma S (H - H_s) \delta_2 + \frac{\gamma Q^2}{gS} \delta_1 \right]^2 + \left(\frac{\delta Q^2}{gS} \delta_4 \right)^2} \quad 11$$

в которой $S = \pi Dh$,

D — диаметр окружности, на которой располагаются оси направляющих лопаток,

h — высота лопаток,

γ — объемный вес воды,

g — ускорение силы тяжести,

Q — расход турбины,

H — напор,

H_s — высота всасывания,

d — диаметр цапф направляющих лопаток,

f — коэффициент трения в цапфах,

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ — отвлеченные коэффициенты — функции угла поворота лопаток β .

Так как расход всех турбин приблизительно пропорционален квадратному корню из напора и открытию направляющего аппарата α^* , то есть

$$\frac{Q}{Q_*} \approx \alpha \sqrt{\frac{H}{H_*}} \quad 12$$

где Q_* и H_* — значения Q и H при номинальном режиме. Пренебрегая высотой всасывания по сравнению с полным напором, формулу 11 можно представить в виде:

$$M = \frac{H}{H_*} \gamma \left\{ \frac{Q_* \alpha^2}{gS} D \delta_1 \pm \frac{1}{2} f d \sqrt{\left[S H_* \delta_2 + \frac{Q_*^2 \alpha^2}{gS} \delta_3 \right]^2 + \left(\frac{Q_*^2 \alpha^2}{gS} \delta_4 \right)^2} \right\}$$

Произведение выражения, стоящего в фигурных скобках, на объемный вес воды γ обозначим через M_0 ; тогда, в силу формулы 10

$$R = \frac{H}{H_*} M_0 \frac{d\beta}{dz_s} = \frac{H}{H_*} R_0 \quad 13$$

Величины M_0 и R_0 суть соответственно момент, необходимый для поворота направляющих лопаток и усилие, которое необходимо приложить к поршню сервомотора для создания этого момента при постоянном напоре $H = H_*$. Очевидно, что M_0 и R_0 зависят только от величины x_s .

Уравнения 9' и 9" теперь могут быть перемещены так:

$$T_s \frac{dx_s}{dt} = x_c \sqrt{1 - \xi \psi(x_s)} \quad \text{при } |x_c| < 1 \quad 14'$$

$$T_s \frac{dx_s}{dt} = \pm \sqrt{1 - \xi \psi(x_s)} \quad \text{при } |x_c| \geq 1 \quad 14''$$

где $\xi = \frac{H}{H_*}$, а функция ψ определяется выражением:

$$\psi(x_s) = \pm \frac{R_0}{\rho_0 F_s} \quad 15$$

На фиг. 2 даны примерные кривые зависимости величины $\pm M_0$ от просвета между лопатками направляющего аппарата, заимствованные из книги Пинегина [1]. Приблизительно такой же вид имеют и кривые зависимости величины $\pm R_0$ от x_s . Эти кривые, как

* Это совершенно точно только для активных турбин. Для турбин реактивных более точная зависимость дается в нашей другой работе [3].

и следовало ожидать, различны при открытии и закрытии турбины.

Под открытием направляющего аппарата турбины подразумевается или отношение α_1 просвета между лопатками к просвету при работе турбины с полной нагрузкой или отношение α расхода турбины при данном положении направляющих лопаток, номинальном напоре и номинальном числе оборотов к расходу при полной нагрузке. Как α_1 , так и α всецело определяются величиной x_s , но, вообще говоря, $\alpha_1 \neq \alpha$. В теории гидравлического удара удобнее определять открытие турбины величиной α , чего мы и будем придерживаться.

На основании всего изложенного можно прийти к заключению, что обычно принимаемый линейный закон регулирования имеет место в действительности только при соблюдении следующих условий:

1. Параметры регулятора скорости подобраны так, что при данном сбросе или набросе нагрузки окна масло распределительного золотника регулятора открываются полностью в самом начале процесса регулирования, который происходит, поэтому, по уравнению 14.

2. Предельное усилие сервомотора $p_0 F_s$ значительно больше максимальной (в данном диапазоне изменения x_s) величины усилия R_0 , фактически необходимого для поворота лопаток, так что величина $\xi \psi(x_s)$, пренебрежимо мала по сравнению с единицей, в силу чего уравнение 14" может быть переписано так:

$$T_s \frac{dx_s}{dt} = \pm 1,$$

откуда

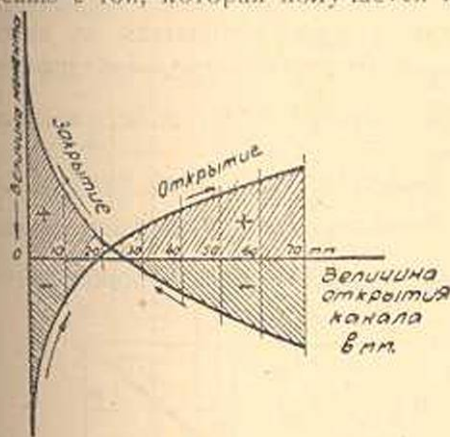
$$x_s = \pm \frac{t}{T_s} + \text{const} \quad 16$$

3. Открытие турбины α есть линейная функция хода поршня сервомотора x_s , то есть с достаточной точностью можно принять, что $\alpha = x_s$.

Если хотя бы одно из этих условий не удовлетворено, закон регулирования будет отличаться от линейного. Как показывает ряд подсчетов, третье из этих условий большей частью удовлетворяется. Первое условие, обычно, так же удовлетворяется. Турбостроительные заводы стремятся конструировать золотники так, чтобы их окна открывались полностью по возможности через очень короткое время после сброса или наброса нагрузки, чем достигается компактность и экономность конструкций золотников. Учитывая эту тенденцию и пренебрегая теми незначительными промежутками времени в начале и в конце процесса регулирования, когда окна золотника открыты лишь частично, можно считать, что весь процесс перемещения регулирующих органов турбины из положения соответствующего нагрузке, имевшей место до аварии ($\alpha = \alpha_0$) в положение,

соответствующее нагрузке, устанавливающейся после аварии ($x_0 = x_k$, совершается при $|x_c| \geq 1$ по уравнению 14").

Что касается второго условия, то до последних лет многие заводы предусматривали значительные запасы в предельных усилиях сервомоторов, $p_0 F_s$, по сравнению с фактически необходимыми R , то есть задавали $p_0 F_s \gg |R_0|_{\max}$. В настоящее время заводы отступают от этого принципа конструирования регуляторов, по двум причинам: во-первых в силу стремления к компактности и экономности сервомотора и масляной системы регулятора, а во-вторых, именно потому, что уменьшение величины $p_0 F_s$ по сравнению с R_0 приводит к нелинейному закону регулирования, который в целом ряде случаев дает смягчение величины гидравлического удара по сравнению с той, которая получается при линейном законе.



Фиг. 2

Для оценки тех соотношений между $p_0 F_s$ и R , при которых закон регулирования можно считать линейным, нет необходимости исходить из точных данных, о значениях функции ψ , достаточно руководствоваться ее общим характером. Общее течение функции $\pm M_0$ (фиг. 2) подсказывает, что с достаточной для качественных суждений точностью, величину

$$\Pi = \sqrt{1 - \xi\psi(x_s)}$$

в интервале изменения x_s от $x_s = x_{s*}$ (холостой ход агрегата) до $x_s = 1$ (полная нагрузка), можно рассматривать как линейную функцию x_s . Тогда, полагая, что $\Pi = 1$ при $x_s = x_{s*}$, будем иметь

$$\Pi = \frac{x_s - x_{s*}}{1 - x_{s*}} [\Pi(1) - 1] + 1, \quad 18$$

где $\Pi(1) = \sqrt{1 - m}$, а m есть значение $\xi\psi(x_s)$ при $x_s = 1$.

Из уравнений 14", 17 и 18 легко получить:

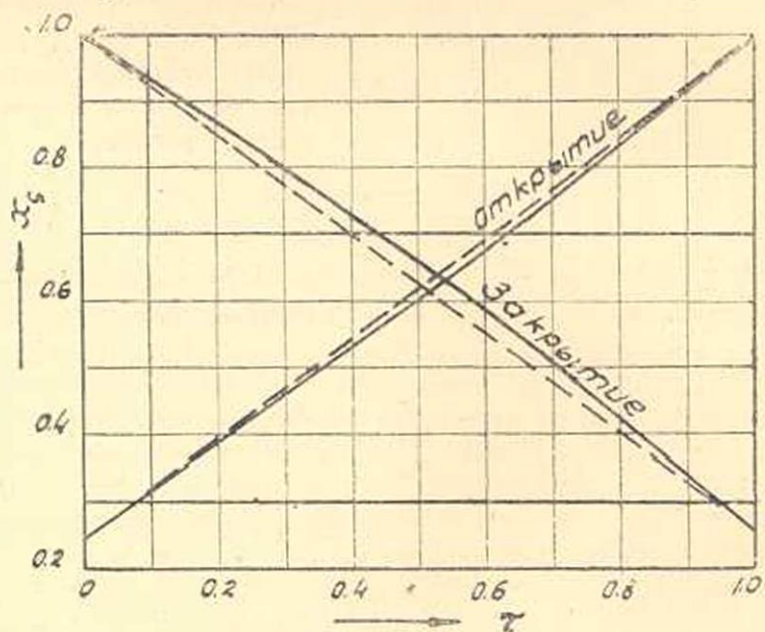
$$x_s = (x_{s0} + A)e^{t/\tau} - A,$$

где x_{s0} — значение x_s при $t = 0$ и

$$\tau = \frac{t}{(1 - x_{s*}) T_s}, \quad T = \frac{T_s}{\Pi_{cp}}, \quad \Pi_{cp} = \frac{\Pi(1) + 1}{2},$$

$$f = \frac{2 \cdot |\Pi(1) - 1|}{\Pi(1) + 1}, \quad A = \frac{1 - x_s \cdot \Pi(1)}{\Pi(1) - 1}$$

Здесь $\Pi_{\text{ср}}$ есть среднее значение величины Π . Если же принять более грубо $\Pi = \text{const} = \Pi_{\text{ср}}$, то мы получим линейный закон регулирования 16, с той лишь разницей, что вместо постоянной времени сервомотора T_s в нем будет фигурировать постоянная T_0 . На фиг. 3 даны графики зависимости x_s от τ по формуле 19 (сплошные линии) и 16 (пунктир) при $T_s = T_0$, для случая $x_{s*} = 0,25$, $|m| = \frac{1}{2}$. Как видим, при $|m| = 2 \cdot \frac{1}{2}$, фактический закон регулирования можно еще заменять линейным законом, но, разумеется, только в диапазоне $x_s^* < x_s < 1$; при близких к нулю значениях x_s , закон регулирования, как видно из фиг. 2, будет существенно отличаться от линейного закона. Более детальные подсчеты показывают, что значение $|m| = \frac{1}{2}$ и является, приблизительно, практической границей приемлемости предположения о линейном законе регулирования: при $|m| > \frac{1}{2}$ наблюдаются уже существенные отклонения от линейного закона, а при $|m| < \frac{1}{2}$ закон регулирования все более и более приближается



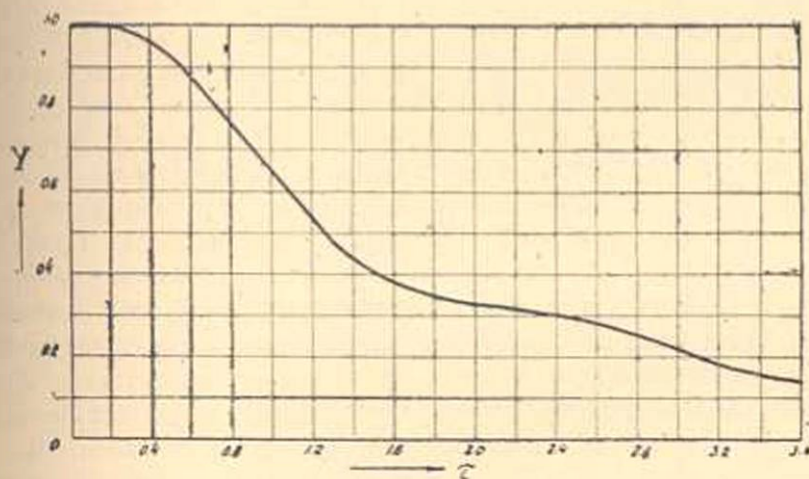
Фиг. 3

к линейному. Этот вывод можно сформулировать так: при значениях открытия турбины α больших, чем то значение, которое соответствует холостому ходу, закон регулирования можно считать линейным, если предельное усилие сервомотора не менее, чем в два

раза превосходит усилие, фактически необходимое для поворота направляющих лопаток при их полном открытии. Если указанное условие не соблюдено, но значения гидравлического удара $\Delta\xi = \xi - 1$ не очень велики по абсолютному значению ($\Delta\xi < 0,35 - 0,40$), то, как показывают подсчеты, в уравнении 14^а без особой погрешности можно принять $\xi = 1$. Тогда закон регулирования определится выражением

$$t = \pm T_s \int \frac{dx_s}{\sqrt{1 - \phi(x_s)}} + C \quad 20$$

Поскольку функция $\phi(x_s)$ задается графически или таблично, на основании данных заводских испытаний направляющих аппаратов, то вычисление интеграла в выражении 20 выполняется графическим или численным способом.



Фиг. 4

При больших значениях $\Delta\xi$ закон регулирования не может быть заранее задан. В этом случае расчет гидравлического удара должен выполняться последовательными приближениями. В первом приближении можно принять в уравнении 14^а $\xi = 1$ и интегрированием этого уравнения получить в первом приближении закон регулирования $x_s = x'_s(t)$, по которому определить первое приближение величины $\xi = \xi'(t)$. Построив график зависимости ξ' от x'_s , можно положить в уравнении 14^а $\xi\phi(x_s) = \xi'\phi(x'_s)$ и получить таким же путем второе приближение $x_s = x''_s(t)$ и $\xi = \xi''(t)$ и так далее*.

* В данном случае предполагается, что величина гидравлического удара не зависит от числа оборотов машины, которое изменяется при регулировании. В действительности это не так, поскольку расход реактивных турбин зависит от числа оборотов. Однако, произведенные нами подсчеты, которые здесь не приводятся, как не имеющие прямого отношения к предмету данной статьи, показали, что в расчетах гидравлического удара с этой зависимостью можно не считаться.

Как уже указывалось, подбором надлежащей формы закона регулирования или, точнее, функции $\psi(x_s)$, можно добиться смягчения величины гидравлического удара. Так, например, если при линейном законе регулирования наибольший удар получается в конце первой фазы, то целесообразно несколько снизить скорость регулирования в начале процесса; если же наибольшим ударом является удар в конце закрытия турбин, то целесообразно ускорить регулирование в начале процесса и замедлить в конце.

На вопросе о наивыгоднейшей форме закона регулирования, детально освещенном в работе Кривченко [4], мы здесь не будем останавливаться.

Нужно иметь в виду, что турбостроительные заводы имеют возможность варьировать форму функции $\psi(x_s)$, в общем, в довольно широких пределах, подбором соответствующей величины отношения m , той или иной балансировкой направляющих лопаток и рядом других конструктивных мероприятий. Все это позволяет подойти к расчету гидравлического удара при проектировании гидроэлектрических станций с несколько иной точки зрения, чем это обычно делается. Инженеру, проектирующему силовой узел гидроэлектрической установки, истинный закон регулирования, как правило, не бывает известен и расчет гидравлического удара ведется обычно по формулам, выведенным для линейного закона регулирования. Правильнее, однако, поставить вопрос так, что при проектировании станции должен быть найден закон регулирования, который даст наименьшее значение максимальной величины удара. Этот закон будет, конечно, подлежать дальнейшему уточнению на заводе, поставляющем гидромеханическое оборудование, но, тем не менее, такая постановка вопроса гораздо ближе подведет проектировщика силового узла к истинным значениям удара, чем, например, расчет по формулам Алливи. Практически, конечно, нет никакого смысла отыскивать закон регулирования в форме какой-то кривой $x_s = x_s(t)$. Вполне достаточно считать, что эта кривая может быть с требуемой точностью аппроксимирована ломаной, состоящей из 2—3 прямых отрезков, и отыскивать форму такой ломаной.

До сих пор мы считали, что процесс регулирования, или, точнее говоря, большая часть этого процесса, протекает в соответствии с уравнением 14". Рассмотрим теперь случай, когда регулирование осуществляется по уравнению 14'.

В этом случае, даже при $p_0 F_s \gg |R_0|_{\max}$ закон регулирования не только не может быть принят линейным, но и вообще не может быть заранее задан; его можно выяснить только в результате совместного интегрирования всех уравнений машины и регулятора.

Имея в виду опять только качественную сторону дела примем, что $p_0 F_s \gg |R_0|_{\max}$ и напишем уравнение 14' приближенно в таком виде:

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{x_c}{T_s} \quad 21$$

Считая, далее, что регулятор турбины не имеет промежуточных ступеней усиления и установлен на нулевую остаточную неравномерность, напомним известные уравнения регулирования (без учета нелинейностей):

уравнение маятника

$$x_r = a(1 - \varphi), \quad 22$$

уравнение золотника

$$x_r = x_c + x_k, \quad 23$$

уравнение выключателя (обратной связи)

$$\frac{dx_k}{dt} = \mu \frac{dx_s}{dt} - \frac{x_k}{T_k}, \quad 24$$

где x_r и x_k — относительные перемещения муфты маятника и тяги выключателя, φ — относительное число оборотов машины, μ , a и T_k — постоянные регулятора, причем

$$a = \frac{100z_r}{h_c \delta} \quad 25$$

Здесь δ — степень неравномерности маятника в ‰, а z_r — перемещение муфты маятника при изменении числа его оборотов на величину δ .

В уравнении машины

$$M = P + T_a \frac{d\varphi}{dt}, \quad 26$$

где T_a — постоянная инерции, электрический момент P будем считать постоянным. Механический же момент M зависит от величины x_s , числа оборотов φ и напора ξ . Зависимость момента M от напора ξ исключает возможность задания закона регулирования независимо от расчета гидравлического удара. Но, чтобы выяснить общий характер закона регулирования в рассматриваемом случае, мы будем считать момент M линейно зависящим только от x_s :

$$M = \frac{x_s - x_{s*}}{1 - x_{s*}} \quad 27$$

Из уравнений 21—24, 26 и 27 следует

$$\frac{d^2 x_s}{d\tau^2} + (1 + K) \frac{dx_s}{d\tau} + A \frac{dx_s}{d\tau} + AKx_s = AK[P(1 - x_{s*}) + x_{s*}], \quad 28$$

где

$$\tau = \frac{\mu}{T_s} t, \quad K = \frac{T_s}{\mu_1 T_k}, \quad A = \frac{a T_k}{(1-x_{s*}) \mu^2 T_s}$$

Из уравнения 26 и начальных условий

$$\frac{x_s - x_{s*}}{1 - x_{s*}} = M_0, \quad \frac{dx_s}{d\tau} = \frac{d^2 x_s}{d\tau^2} = 0 \text{ при } \tau=0$$

получается

$$\frac{M - P}{M_0 - P} = Y(\tau) \quad 29$$

Если считать, что характеристическое уравнение, соответствующее уравнению 28 имеет один вещественный корень α_1 и два комплексных $\alpha_2 \pm \beta i$, как это и бывает в большинстве случаев, то

$$Y(\tau) = \frac{(\alpha_2^2 + \beta^2) e^{\alpha_1 \tau} + \left[\frac{\alpha_1}{\beta} (\alpha_2^2 - \alpha_1 \alpha_2 - \beta^2) \sin \beta \tau + \alpha_1 (\alpha_1 - 2\alpha_2) \cos \beta \tau \right] e^{\alpha_2 \tau}}{(d_1 - d_2)^2 + \beta^2} \quad 30$$

На фиг. 4 дается кривая $Y=Y(\tau)$ при $K=1$, $A=10$. При этих значениях K и A , приблизительно средних из практически возможных, $\alpha_1 = -0,55$, $\alpha_2 = -0,73$, $\beta = 3,01$.

Функция Y определяет закон и продолжительность регулирования. Как видно из фиг. 4 и формулы 30 закон регулирования в данном случае не имеет ничего общего с линейным законом, а продолжительность регулирования не зависит от величины $M_0 - P$, то есть от величины сброшенной или наброшенной нагрузки. Даже более того, нелинейности сервомотора и регулятора, а также зависимость механического момента M от гидравлического удара и числа оборотов машины, не учтенные в наших выкладках, приводят к тому, что в целом ряде случаев продолжительность регулирования при сбросе малых нагрузок оказывается больше, чем при сбросе больших нагрузок.

Установим теперь условия, при которых закон регулирования совершается по уравнению 14". Так как в начале процесса регулирования обратная связь еще не оказывает заметного воздействия на золотник, то для начальных моментов можно принять $x_c \approx x_r$ и написать на основании уравнения 22

$$|x_c| = a |\Delta \varphi|, \quad 31$$

где $\Delta \varphi$ — относительное изменение числа оборотов машины. Из уравнений 31 и 25 следует, что окна золотника откроются полностью при изменении числа оборотов машины на $\Delta \varphi$ в том случае, если

$$\beta < 100 \left| \Delta \varphi \right| \frac{z_r}{h_c}$$

Оценивая временную неравномерность регулирования при сбро-

сах и набросах нагрузки в 35—50%, следует считать, что процесс регулирования может, с достаточной точностью, рассматриваться как полностью совершающийся по уравнению 14", если окна золотника полностью открываются при изменении числа оборотов машины на 3—4%, то есть, если

$$\delta < 3 + 4 \frac{z_r}{h_c}$$

В заключение нужно остановиться на вопросе о так называемых коротких ударах. Коротким называется удар при полном закрытии направляющего аппарата турбины от столь малого первоначального открытия, что время регулирования в точности равно величине фазы гидравлического удара в трубопроводе. Известно, что *если закон регулирования является линейным и время регулирования пропорционально величине первоначального открытия турбины*, то повышение давления при коротком ударе будет наибольшим возможным повышением давления в трубопроводе. Последнее положение, при оговоренных выше условиях (курсив) бесспорно вытекает из уравнений гидравлического удара, но само существование этих условий стоит под сомнением.

Очевидно, что при автоматическом регулировании скорости никакого короткого удара произойти вообще не может: при любом сбросе нагрузки регулятор турбины закроет ее направляющий аппарат не полностью, а лишь до положения, соответствующего холостому ходу. Полное закрытие может получиться только в результате очень сильной, практически недопустимой и поэтому не реальной перерегулировки.

Реально можно говорить о коротком ударе при полной автоматической остановке турбины под воздействием специальных реле, при разного рода эксплуатационных неполадках, например при перегреве подшипников. Но, как видно из фиг. 2, при малых открытиях очень сильно возрастает момент, необходимый для поворота направляющих лопаток, что должно привести к существенному снижению скорости закрытия. Поэтому короткий удар получается при первоначальных открытиях, значительно меньших, чем при линейном законе регулирования с одинаковой во всех случаях скоростью. Поэтому в действительности он будет меньше, чем это даст расчет, основанный на предположении о линейном законе регулирования. Если он все же оказывается больше удара при полном сбросе нагрузки, то он всегда может быть смягчен путем снижения скорости регулирования при малых открытиях соответствующим подбором формы функции $\psi(x_s)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Картвелишвили—Неуставившийся режим работы агрегатов гидроэлектрических станций. Изв. АН Азерб. ССР, № 4, 1945.
2. Л. А. Аркин—Итоги опытов по дросселированию масла. Сб. „Регулирование паровых турбин“. ОНТИ, 1936.
3. Н. А. Картвелишвили—Гидравлический удар в установках с реактивными турбинами. Изв. АН Арм. ССР, № 2, 1948.
4. Г. И. Кривошенко—Уточненные методы расчета гидравлического удара. Гидротехническое Строительство, № 10, 1947.

Ն. Ա. Կարվելիշվիլի

ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՕՐԵՆՔԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում դուրս է բերված տուրբինի սերվոմոտորի ճշտված հավասարումը, որի հիման վրա տրվում է տուրբինի կարգավորման մեխանիզմների փակման և բացման օրենքի վերլուծումը:

Հեղինակը ցույց է տալիս, որ հիդրավլիկական հարվածը հաշվելիս կարգավորման գծային օրենքը ճիշտ է միայն այն դեպքում, եթե սերվոմոտորի առաջացրած մաքուր մալ լարումները տուրբինների կարգավորող մեխանիզմների տեղափոխման համար փաստորեն անհրաժեշտ լարումներից մեծ են վերցրված: Նա նաև հետազոտում է կարգավորման օրենքի նախաօր ձևերն այն դեպքում, երբ լարումների չափազանց մեծ պաշար տեղի չունի: Այնուհետև հեղինակը ցույց է տալիս, որ հիդրավլիկական հարվածը հաշվելիս, որպեսզի բնդհանրապես կարելի լինի կարգավորման օրենքը տալ նախօրը, անհրաժեշտ է կարգավորիչի չափաների այնպիսի բնարտաբյուծ, որպեսզի նրա յուզարաշխիչ զուտանիկի անցքերն անցման պրոցեսի սկզբում բացվեն ամբողջովին: Հակառակ դեպքում կարգավորման օրենքը չի կարելի նախօրը տալ, այլ կարելի է պարզել միայն կարգավորիչի և հիդրավլիկական հարվածի հավասարումների համառոտ ինտեգրման միջոցով:

ГИДРОЛОГИЯ

А. Н. Важнов

К методике прогнозов дождевых паводков на реках
Армянской ССР.

1. Дождевой сток рек Армянской ССР

С развитием гидроэнергетики и ирригации все больше возрастает потребность в прогнозах гидрологического режима не только больших, но и средних и малых рек, сток которых в условиях Армянской ССР, в основном, определяется снегозапасами и дождевыми осадками.

Настоящая работа посвящена рассмотрению режима летних дождевых паводков, существенно влияющих на величину меженного стока. Режим весеннего половодья, прогнозы которого не менее важны для народного хозяйства, в настоящей работе не рассматривается в силу принципиального отличия методологии его изучения и предсказания, и должен служить предметом самостоятельного рассмотрения.

Реки Армении относятся к той категории рек небольших водосборных площадей (до немногих тысяч км²), на которых паводки от интенсивных фронтальных дождей и ливней возникают внезапно, в течение нескольких часов достигают максимума и затем быстро затухают. Такие паводки часто не фиксируются наблюдателями водомерных постов, так как основная масса воды проходит между сроками наблюдений.

Большая интенсивность развития процессов, обусловленная в основном своеобразием горного рельефа, в сочетании с интенсивными денудационными процессами на поверхности земли, в малых пересыхающих руслах часто приводит к образованию селей, аналогичных прошедшему 25 мая 1946 г. в русле р. Гедар. Отсюда становится понятным большое практическое значение предупреждений о паводкообразовании, даже с малой заблаговременностью.

Доля стока от дождевых осадков в общем балансе рек Армянской ССР различна для разных районов. Наиболее значительна она в северных районах, орографически отграниченных от остальной территории горными хребтами, тянущимися почти в широтном направлении. Здесь расположены главным образом реки: Дзорагет, Памбак, Акстафа и Дебет, текущие на восток или северо-восток. На остальной части территории Армении доля дождевого стока значительно меньше. Сюда относятся реки средней части: Раздан (Загн), Гарни, Веди, реки бассейна оз. Севан и реки юго-восточной части:

Арца, Воротан и др. К этой же группе следует отнести и р. Ахурия.

Несколько особое положение занимает р. Касах, водосбор которой, главным образом, расположен на склонах массива горы Арагац. Несмотря на сравнительно невысокий модуль дождевого стока, доля последнего в общем стоке реки значительна, что и сближает эту реку с реками северных районов.

Для того, чтобы составить представление о размерах дождевого стока по отдельным бассейнам, был проведен анализ совмещенных графиков расходов воды, дождевых осадков и температуры воздуха в течение теплого периода с июня по октябрь месяц, за годы с 1931 по 1945. В анализ были введены наиболее крупные реки, в водосборах которых имелись в достаточном количестве наблюдения за осадками, температурой и стоком.

Сопоставляя ход стока с ходом осадков и температуры и используя кривые иссякания стока, хорошо выраженные для лет с малым количеством осадков на спаде половодья, было произведено графическое отделение дождевых паводков от основного стока талых и грунтовых вод. Объем дождевого стока далее определялся планиметрированием отдельно по месяцам и в целом для всего периода. Полученные в результате величины следует рассматривать как приближенные по следующим причинам: во-первых метод графического расчленения гидрографа при помощи кривой иссякания стока, обычно применяющийся в гидрологии, не вполне строг; во-вторых—при недостаточной густоте сети метеорологических станций, особенно в высокогорных районах, объем дождевого стока мог быть завышен в результате недоучета роли снеготаяния в мае месяце; в третьих—водомерные речные наблюдения не вполне точно фиксируют отдельные дождевые паводки, в результате чего получаем некоторое занижение их объема.

К вопросу искажения формы гидрографов паводков в результате наблюдений по водомерной рейке в 2—3 срока в сутки мы вернемся несколько позднее. Здесь же отметим, что это искажение и занижение суммарного стока сильнее скажется при подсчете объема отдельных паводков и гораздо слабее—при подсчете суммарного стока за месяц или сезон, так как единичные паводки сравнительно редки. Последнее обстоятельство и дает нам право выполнить нижеприведенный анализ.

К сожалению, количественной оценки ошибок вычисления стока по речным наблюдениям сейчас сделать нельзя из-за недостатка материалов наблюдений по лимниграфу.

Анализ наблюдений за осадками позволил выделить годы, обильные дождями, средние и засушливые. Характеристики дождевого стока соответствующих лет приведены в таблица 1. Для суждения об относительной роли дождевого стока в общем стоке данной реки произведено сравнение среднего за теплый период года расхода воды, обусловленного дождями, со средне-многолетним полным

(дождевой плюс снеговой и грунтовой) расходом за тот же период. Результаты также помещены в таблице 1.

Из 10 рассмотренных рек, охватывающих все основные климатические районы Армянской ССР, наименьшее значение дождевой составляющей в засушливые годы, равное 1,8–2,3%, от полного средне-многолетнего стока, падает на реки Гарни, Арпа и Кявар; в средние годы она колеблется от 7–8% на реках Кявар и Воротан, до 37% на р. Акстафа, и в дождливые годы достигает 80–85% на реках Дзорагет, Памбак и Акстафа.

Процент дождевого стока рек северных районов Армянской ССР (притоки р. Куры) в дождливые годы равен 80–85% (см. табл. 1, кол. 19), т. е. значительно больше половины средне-многолетнего полного стока за тот же период. К этой группе рек приближается и р. Касах—55,5%. Для лет средней дождливости он равен для тех же рек от 14 до 37%, т. е. также довольно высок.

Для рек средней и юго-восточной частей Республики доля дождевого стока заметно снижается. Для лет средней дождливости она колеблется в незначительных пределах и равна 8–10%, а для лет очень дождливых—от 13% (р. Гарни) до 33% (р. Ахурян). Таким образом и здесь дождевая составляющая играет существенную роль в водном балансе.

Если отнести сток от дождей к единице площади поверхности бассейнов, то полученный модуль стока в годы средней дождливости колеблется для разных рек от 0,7 до 3,0 л/сек км², а для дождливых лет достигает 10 л/сек км² (р. Дзорагет).

Для рек северных районов средний модуль дождевого стока в дождливые годы вообще не снижается ниже 7 л/сек км². В средней же и юго-восточной части территории (включая и р. Касах) модуль не превышает 3,0–3,5 л/сек км².

Из вышеизложенного становится ясным большое значение прогнозов летнего стока, особенно на реках северных районов, где колебания стока в летний период, в результате частых и значительных паводков, достигают больших размеров.

О распределении паводков внутри теплого сезона года дает представление таблица 2, в которой для 11 рек Армении по месяцам дается величина дождевого стока в абсолютных величинах и в сравнении с многолетними средними. Май месяц не рассматривался, так как на многих реках паводки в мае имеют смешанный характер или произошли от снеготаяния.

Из таблицы 2 видим, что дождевая составляющая убывает с мая к сентябрю месяцу и немного повышается в октябре. На реках Дзорагет, Памбак и Акстафа в особенно дождливые годы расход воды в июне—июле месяцах достигает и даже превосходит максимум весеннего половодья, а объем одного только дождевого стока иногда превышает величину средне-многолетнего стока за те же месяцы в 1,5–2 раза.

Характеристика дождевого стока в среднем за период с июня по октябрь в сравнении с многолетним средним полным стоком за тот же период

Таблица 1

№ п.п.	Река	Замыкающий створ	Площадь водосбора в км ²	Характеристика стока за период с июня по октябрь								
				Лето засушливое			Лето со средними осадками			Лето дождливое		
				Средний расход дождевого стока за период июнь-октябрь, м ³ /сек.	Средний модуль дождевого стока за период июнь-октябрь, л/сек. км ²	% дождев. стока от средне-многолетн. за период	Средний расход дождевого стока за период июнь-октябрь в м ³ /сек.	Средний модуль дождевого стока за период июнь-октябрь, л/сек. км ²	% дождевого стока от полного средне-многолетнего за период	Средний расход дождевого стока за период июнь-октябрь в м ³ /сек.	Средний модуль дождевого стока за период июнь-октябрь, л/сек. км ²	% дождевого стока от полного средне-многолетнего за период
1	Дзорагет	п. р. Гергерки	1450	1,35	0,93	7,7	2,50	1,72	14,2	14,3	9,9	81,4
2	Памбак	ст. Коласерап	1370	0,73	0,53	6,3	2,94	2,14	25,0	9,85	7,2	84,0
3	Актафа	г. Иджеван	1180	0,31	0,26	3,1	3,77	3,20	37,2	8,58	7,3	85,0
4	Касах	с. Аштарах	932	0,44	0,47	9,7	1,00	1,07	22,1	2,51	2,7	55,5
5	Арпа	с. Арпа	2060	0,65	0,32	2,3	2,75	1,31	9,7	5,22	2,5	18,4
6	Кявар	с. Нордуг	409	0,07	0,17	1,9	0,29	0,71	7,8	0,82	2,0	22,0
7	Воротан	с. Эйвазляр	2020	0,87	0,43	3,5	1,96	0,97	7,9	4,04	2,0	16,3
8	Гарин	с. Зовашен	512	0,13	0,25	1,8	0,60	1,20	8,4	0,95	1,9	13,3
9	Ахурян	с. Канс	839	0,28	0,33	3,2	0,73	0,87	8,2	2,90	3,4	32,8

ПРИМЕЧАНИЕ: Для р. Кявар характеристики летнего стока приведены за период с июля по октябрь включительно.

№№ по пор.	Река	Замыкающий створ	Характеристика года.	Средне-месячные характеристики годового стока									
				Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
				Средн. расход, м³/сек.	% от полного среднего многолетнего	Средн. расход, м³/сек.	% от полного среднего многолетнего	Средн. расход, м³/сек.	% от полн. среднего многолетнего	Средн. расход, м³/сек.	% от полного среднего многолетнего	Средний расход м³/сек.	% от полного среднего многолетнего
1	Дзюратет	и. р. Терсерки	Засуха. Средняя Дождлив.	8,0 4,0 12,0	14,0 18,0 84,0	0,7 8,0 24,0	5,0 19,0 168,0	1,0 3,0 20,0	7,4 22,0 146,0	0,5 1,0 9,0	5,0 9,0 83,0	1,6 2,0 6,0	16,0 20,0 60,0
2	Павлов	ст. Колотеран	Засуха. Средний Дождлив.	2,0 4,0 10,0	18,0 26,0 63,0	0,6 4,5 16,0	7,0 54,0 180,0	0,4 4,0 16,0	7,0 71,0 284,0	0,4 1,2 4,8	8,0 23,0 100,0	0,2 1,5 2,8	3,5 26,0 49,0
3	Актафа	г. Иджеван	Засуха. Средний Дождлив.	0,6 5,0 9,4	4,2 36,0 66,0	0,4 5,0 11,0	5,4 68,0 160,0	0,8 2,0 12,0	6,0 42,0 260,0	0,1 4,0 6,2	3,0 106,0 165,0	0,1 3,0 4,0	3,0 76,0 102,0
4	Ахуран	с. Канс	Засуха. Средний Дождлив.	0,5 1,6 5,8	3,0 16,0 57,0	0,3 0,9 8,0	4,0 12,0 40,0	0,2 0,4 2,0	4,0 7,4 37,0	0,4 0,5 2,4	8,0 10,0 46,0	0 0,3 1,6	0 6,0 30,0

1	2	3	4	5	6	7
5	Касак	с. Аштарак.	Засушл. Средний Дождлив.	0,7 1,5 3,2	13,0 28,0 60,0	0,6 1,4 3,0
6	Гарни	с. Зовашен.	Засушл. Средний Дождлив.	0,6 1,2 1,7	6,0 12,0 17,0	0,06 0,6 0,9
7	Веди	с. Карабахдар	Засушл. Средний Дождлив.	0,1 0,2 0,8	3,2 6,3 25,0	0,2 0,6 0,7
8	Арпа	с. Арпа	Засушл. Средний Дождлив.	1,2 5,3 16,0	2,3 10,0 30,0	1,2 3,0 5,0
9	Воротан.	с. Ейвазлар	Засушл. Средний Дождлив.	1,9 4,0 8,5	5,0 10,0 28,0	0,9 2,0 6,0
10	Кявар	с. Норадуз	Засушл. Средний Дождлив.	— — —	— — —	0,1 0,2 1,0
11	Адияман.	с. Адияман	Засушл. Средний Дождлив.	— — —	— — —	0,4 0,6 1,5

8	9	10	11	12	13	14
18,0	0,2	8,0	0,1	4,4	0,2	7,0
42,6	1,0	41,0	0,4	18,0	0,7	25,0
90,0	1,8	74,0	1,7	74,0	2,0	73,0
1,1	0,01	0,2	0	0	0	0
11,0	0,6	13,0	0,3	7,0	0,6	13,0
16,0	0,7	15,6	0,4	9,0	0,9	19,0
15,0	0,1	11,0	0,06	8,0	0,03	3,0
45,0	0,2	23,0	0,2	25,0	0,2	19,0
53,0	0,5	57,0	0,4	51,0	0,5	48,0
6,6	0,3	4,0	0,3	4,0	0,3	4,0
16,0	2,6	33,0	1,2	17,0	1,6	20,0
27,0	3,5	44,0	1,5	21,0	4,0	51,0
6,0	0,7	6,4	0,6	6,0	0,3	2,6
13,0	2,0	18,0	1,0	9,6	1,0	9,9
38,0	2,4	22,0	1,6	15,0	1,5	13,0
4,0	0,2	7,0	0,04	1,5	0,1	3,0
8,0	0,4	14,0	0,5	18,0	0,4	14,0
39,0	1,4	53,0	0,6	22,0	0,7	24,0
12,0	0,1	5,0	0,03	1,6	0,1	6,0
18,0	0,2	10,0	0,2	11,0	0,2	11,0
46,0	0,4	20,0	0,9	48,0	0,6	34,0

В годы со средним количеством жидких осадков дождевая составляющая на указанных 3-х реках колеблется от 1—2 м³/сек в августе—сентябре, до 4—5 м³/сек в июне месяце; в дождливые же годы повышается до 10—12 м³/сек в июне, а в засушливые—снижается до десятых долей кубометра в секунду.

На р. Касах в средние годы дождевая составляющая колеблется от 0,4 м³/сек в сентябре до 1,5 м³/сек в июне, а в засушливые—снижается до 0,1 м³/сек. В процентном отношении к полному среднему стоку она остается менее 100%.

На реках Ахурия, Гарни, Веди и на реках Севанского бассейна расходы дождевого стока для среднего года колеблются от 0,1—0,3 м³/сек в августе—сентябре месяцах, до 1—2 м³/сек в июне; в дождливые годы повышаются в начале лета до 5—6 м³/сек, и в засушливые—снижаются до нуля (Ахурия, Гарни—сентябрь—ноябрь месяцы).

В процентном отношении они не превышают 50—60% от полного среднего стока, даже в очень дождливые месяцы.

На реках Арпа и Воротан расход дождевого стока колеблется для среднего года от 1,0—1,5 м³/сек. в сентябре—октябре, до 5,0 м³/сек в июне; в дождливые годы—повышается до 16,0 м³/сек в июне, а в засушливые—снижается до 0,2—0,5 м³/сек в осенние месяцы. В процентном отношении от полного среднего стока он не превосходит 40—50% в самые дождливые месяцы.

В целом, для всей территории Армянской ССР дождевой сток наиболее значительных размеров достигает на спаде снегового половодья, которое хоть и не в одинаковой степени, но все же достаточно четко выражено на всех реках. Задача прогноза расходов и объема половодья, таким образом, также не может быть решена без удовлетворительной методики предвычисления гидрографов дождевых паводков.

2. Дождевые паводки

Переходя к характеристике формирования дождевых паводков, прежде всего был подвергнут критической оценке исходный гидрометрический материал.

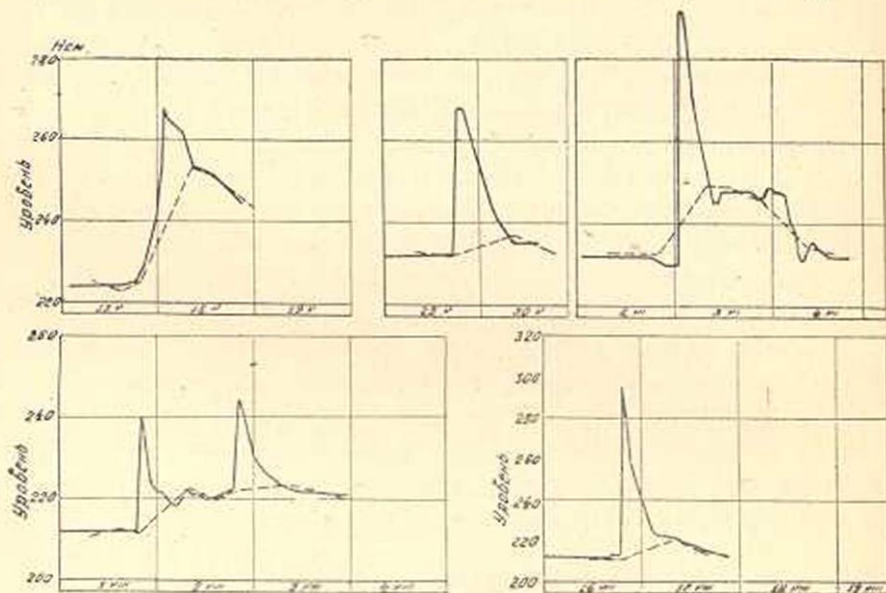
Как известно, основные водомерные наблюдения на реках Армении проводятся при помощи водомерных реек, по которым наблюдатели отсчитывают уровень один, два, или—максимум—три раза в сутки, в зависимости от важности объекта. Таким образом, графики изменения расходов воды строятся по точкам с интервалами от 6 до 24 часов.

Между тем на реках с площадями водосборов от нескольких десятков км² до нескольких тысяч км², при больших уклонах рельефа и большой изменчивости интенсивности паводкообразующих осадков паводки, как было указано выше, развиваются чрезвычайно быстро и характерные точки графика изменения уровня наблюдателями могут быть упущены. В результате, мы вправе ожидать занижение расходов и искажение самой формы графика паводка.

Для того, чтобы судить о размерах искажения, были построены совмещенные графики изменения уровней воды для 12 наиболее значительных паводков р. Касах у с. Аштарак по лимниграммам и по речным записям. Часть из этих паводков приведена на черт.1.

На графиках видим, что часы срочных наблюдений, как правило, не совпадают с моментом пика паводка, а попадают или на спад или на подъем его. Несовпадение объясняется тем, что в летний период дожди начинаются чаще всего во второй половине дня и пики паводков проходят между 20-часовым вечерним и 8-часовым утренним сроками наблюдений.

В таблице 3 приведены 11 паводков, для которых среднесуточные расходы получены по уровням самописца и по речным уровням.



Черт.1. Совмещенные графики расходов воды: Касах у с. Аштарак
— по лимниграфу, --- по речным уровням

черт. 1.

Из таблицы видим, что ошибки в отдельные дни достигают 30 и более процентов. Средняя ошибка оказалась равной 17% от величины самого расхода.

Еще большие ошибки получены при сравнении максимальных расходов (табл. 4). В отдельных случаях они в 2—3 раза больше самих вычисленных расходов.

Из-за отсутствия достаточного количества параллельных (по рейке и по лимниграфу) наблюдений уровней воды на других реках, в настоящее время нет возможности сделать какие-либо обобщающие выводы. Тем не менее и на других реках в дни с паводками мы вправе ожидать значительных ошибок в уровнях и расходах воды. Это обстоятельство лишает возможности дать детальный анализ основных характеристик паводков: высоты подъема уровня над

Таблица 3

Сравнение среднесуточных расходов по лимниграфу и по речным наблюдениям р. Касах—с. Аштарак.

№ п/п	Д а т а паводка	Расход воды в м³/сек.		Ошибка в м³/сек.	Ошибка в 0/0/0 к расходу.
		По лимни- графу	По рейке		
1	1937 г. 9 V	10,7	10,6	-0,10	- 1,0
	10 V	11,3	11,1	-0,20	- 1,0
2	17 V	5,0	4,85	-0,15	- 3,1
	18 V	15,5	16,1	+0,60	+ 3,7
3	29 V	10,6	7,21	-3,39	-47,0
	30 V	10,0	9,29	-0,71	- 7,5
4	2 VI	9,30	10,6	+0,90	+ 8,5
	3 VI	14,3	18,9	-4,7	-24,8
5	7 VI	11,2	9,25	-1,95	-21,1
	8 VI	12,0	11,1	-0,90	- 8,1
6	25 VI	6,50	8,80	+2,80	+26,2
	26 VI	10,0	7,94	-2,06	-26,0
7	29 VI	5,20	7,59	+2,39	+31,5
	30 VI	7,50	9,25	+1,75	+18,9
8	1 VII	6,40	6,83	+0,43	+ 6,3
	30 VII	2,20	2,45	+0,25	+10,2
	31 VII	4,00	3,45	-0,55	-15,9
9	1 VIII	3,40	2,70	-0,70	-25,9
	2 VIII	6,80	5,81	-0,99	-17,0
	3 VIII	6,00	5,81	-0,19	- 3,3
10	14 VIII	3,30	3,20	-0,10	-0,03
	15 VIII	3,00	3,20	+0,20	+ 1,0
11	16 VIII	6,70	3,45	-3,25	-94,2
	17 VIII	5,00	4,85	-0,15	- 3,1

Таблица 4

Сравнение максимальных расходов паводков, вычисленных по лимниграммам и по срочным уровенным наблюдениям р. Касах—с. Аштарак.

№ п/п	Д а т а паводка		Максимальный расход м³/сек.		Ошибка в определении Q _{макс} в м³/сек
			По лимни- графу	По срочным уровням	
1	1937	9 V	19,5	12,5	— 7,0
2	"	18 V	10,0	18,0	—12,0
3	"	29 V	30,0	9,2	—22,8
4	"	2 VI	67,0	19,5	—47,5
5	"	25 VI	20,0	10,5	— 9,5
6	"	29 VI	9,5	9,2	— 0,3
7	"	30 VI	10,5	7,5	— 3,0
8	"	1 VIII	13,2	6,0	— 7,2
9	"	2 VIII	15,5	6,0	— 9,5
10	"	16 VIII	80,0	5,5	—74,5

исходным, коэффициентов стекания осадков, скоростей добегания и других. Для того, чтобы все же составить представление о сравнительных характеристиках для разных рек, были обработаны речные водомерные наблюдения, которые там, где это было возможно, дополнялись лимниграфными данными.

Высота подъема уровня над исходным или меженным является одной из основных характеристик паводков. Статистическая обработка уровенных наблюдений по 16 рекам за многолетний период показала, что наибольшее число дождевых паводков наблюдается на Араксе — 6,2 паводка в год (среднее за многолетие), на Дзорагете — 3,7, Памбаке — 3,8 и на Акстафе — 4,4. Высота подъема уровня на них также наибольшая и достигает 1,5—2,0 метра.

На реках Ахурия, Сев-Джур, Касах, Воротан и Гарни среднее число паводков равно 2—2,5 в год, т. е. меньше, чем для первой группы, а наибольшая высота подъема не превосходит 1,0—1,5 м.

На реках Раздан, Веди, Арпа, Охчи, Кявар и Адияман среднее число паводков равно 0,7—1,4; наибольший подъем уровня не превосходит 0,6—1,0 м.

На всех реках наибольшее количество дождевых паводков приходится на май; в июне число их уменьшается и затем резко сокращается в течение последующих месяцев. На весну падает и наибольшая высота подъема уровня.

На реках Аракс, Дзорагет, Памбак, Акстафа и Касах подъемы выше 0,2 м. наблюдаются в течение всего лета. На остальных реках средней и юго-восточной части Армянской ССР и в Севанском бассейне подъемы выше 0,2 м. в период с августа по октябрь наблюдаются чрезвычайно редко.

К наиболее беспаводочным рекам следует отнести Гарни, Арпу, Воротан и реки бассейна оз. Севан.

Таблица 5

Время концентрации осадков к замыкающему створу.

№ п/п	Река	Створ	Площ. басс. в км ²	Время концентрации в часах		Число паводков
				Среднее	Пределы	
1	Ахурия	с. Канс	839	8	5—12	14
2	Памбак	ст. Колагеран	1370	10	6—14	26
3	Дзорагет	п. р. Гергерки	1450	15	12—18	33
4	Акстафа	г. Иджеван	1180	9	5—13	15
5	Касах	с. Аштарак	932	9	5—13	12
6	Гарни	с. Зовашен	512	(6)	—	4
7	Арпа	с. Арпа	2060	(7)	—	4
8	Воротан	с. Эйвазяр	2020	13	8—17	10

В качестве второй основной характеристики паводков на реках Армении рассмотрим время формирования $Q_{\max}$ от начала выпадения осадков по отдельным бассейнам (см. табл. 5).

Длительность подъема паводка, близкая к времени концентрации осадков, как видим находится в пределах одних суток.

Колебание времени концентрации для разных паводков обусловлено различием в условиях формирования самих паводков. В зависимости от интенсивности дождя скорости стекания будут различными; здесь не малую роль играет и степень иссушенности почвы перед ливнем, в результате чего часть осадков, особенно в начале дождя, расходуется на инфильтрацию, благодаря чему и замедляется процесс стекания.

Эти различия во времени концентрации в общих чертах удалось выявить из анализа гидрометрических материалов. Например для р. Памбак удалось выделить 3 группы характерных осадков, для которых время стекания существенно разнится. Для первой группы осадков обложного характера, равномерно покрывающих весь водосбор, оно равно в среднем 14 часам. Для второй группы осадков, неравномерно распределенных на площади, но длительных во времени, оно равно 10 часам. Наконец, для третьей группы с осадками ливневого характера со сгущением их в средней и нижней частях бассейна время концентрации равно 6 часам.

Для бассейна Дзорагет, при осадках длительностью более 12 часов, среднее время концентрации равно 18 часам, а при осадках меньшей длительности—12 часам. Для бассейна Касах при ливневых осадках оно равно 6 часам, а при осадках длительных и равномерных—10 часам.

Таким образом предсказание паводков на всех реках Армении, исключая Аракс, где время добегания находится в пределах 3 суток, даже при наличии своевременной информации об осадках, возможно лишь с заблаговременностью от нескольких часов до одних суток, в зависимости от размеров бассейна. Увеличение заблаговременности возможно только при наличии прогноза осадков, чего до сих пор еще не научились делать с требующейся точностью. Из этого, конечно, не следует, что от увеличения заблаговременности прогнозов в настоящее время следует отказаться. На первых порах могут быть использованы и прогнозы погоды, дающие осредненные характеристики по большой территории. Но даже при отсутствии всякого прогноза осадков, предупреждение о паводках с малой заблаговременностью имеет все же большое практическое значение.

В качестве третьей важной характеристики дождевых паводков рассмотрим соотношение количества стекшей в русло воды и количества осадков, вызвавших этот сток.

Объем дождевого паводка будет определяться как количеством осадков, так и величинами потерь при их стекании. Размеры потерь для данного водосбора определяются в основном характером почвенного и растительного покрова, геологией и рельефом мест-

ности, но будут варьировать в зависимости от целого ряда факторов, предшествующих и сопутствующих данному дождю, как-то: влажность почвы, температура воздуха и др. В качестве показателя эффективности дождя в отношении паводкообразования примем коэффициент стока—отношение слоя стока к слою осадков, вызывавших данный сток.

При анализе изменчивости коэффициента стока в первую очередь рассматривалась река Касах, по которой имелись лимниграммы за 1937 год. Следует все же иметь в виду, что коэффициенты определены приближенно, так как средний слой осадков на водосборе вычислялся по недостаточному числу пунктов-наблюдений.

В таблице 6 показано изменение коэффициентов стока от паводка к паводку в течение одного летнего сезона. Как видим, в течение лета наибольшие коэффициенты поверхностного стока менялись от 0,05 до 0,13, в зависимости от влагонасыщенности бассейна к началу паводка и характера дождя. Среднее значение коэффициента равно 0,08.

Что касается наименьших значений коэффициентов, соответствующих условиям сильной иссушенности почв и осадкам малой интенсивности и продолжительности, то они снижаются до нуля, так как вся вода расходуется на смачивание верхних слоев почвы и на испарение, и не достигает замыкающих створов.

Для других районов Армении средние коэффициенты дождевого стока, очевидно, будут несколько отличаться от полученных для реки Касах, в зависимости от проницаемости горных пород и климатических особенностей района. Однако эти отличия не должны быть большими. Довольно грубый подсчет, произведенный по речным наблюдениям для р. Раздан показал, что среднее значение коэффициента из 19 наибольших паводков равно 0,10, т. е. несколько больше, чем для Касаха.

Коэффициенты стока дождевых паводков р. Касах у с. Аштарак

Таблица 6

№ п/п	Дата паводка		Слой стока в мм	Средний слой осадк. в мм	Коэфф. стока па- водка
1	1937 г.	9—10 V	0,72	9,9	0,07
2	"	17—19 V	1,27	17,7	0,07
3	"	29—30 V	0,45	8,3	0,05
4	"	3—4 VII	1,86	14,6	0,13
5	"	7—8 VI	0,61	7,6	0,08
6	"	25—27 VI	0,76	6,2	0,12
7	"	29 VI — 1 VII	1,02	14,0	0,07
8	"	30 VII — 3 VIII	1,05	13,6	0,08
9	"	14 VIII — 17 VIII	1,02	17,2	0,06
				Среднее	0,08

Приведенные в табл. 6 коэффициенты паводкового стока сравним с коэффициентами, полученными на Валдайской гидрологической станции (Европейская территория Союза)*.

По наблюдениям указанной станции, на малых водосборах с супесчаными и суглинистыми грунтами коэффициент стока менялся от дождя к дождю от нуля до 0,14—0,29. В зависимости от степени облесенности и заболоченности территории для одного и того же дождя коэффициент колебался от 0,06 до 0,29.

По сравнению с условиями Армении здесь мы имеем, таким образом, более высокие значения коэффициента. Это объясняется в основном более влажным климатом района Валдайской возвышенности и меньшей проницаемостью почвогрунтов по сравнению с трещиноватыми породами вулканического происхождения Армянского нагорья.

Выводы

Приведенная выше краткая характеристика особенностей режима дождевых паводков на реках Армянской ССР позволяет сделать следующие выводы в отношении развития методов гидрологических прогнозов:

а) Дождевой сток является существенной компонентой в общем стоке рек Армянской ССР и особенно на реках северных районов. Поэтому предсказание паводков следует рассматривать как неотъемлемую часть прогнозов общей водоносности.

б) В условиях быстрого стекания дождевых осадков к замыкающему створу, когда интервал от начала дождя до пика паводка не превосходит 16—18 часов, а весь паводок, вызванный отдельным дождем, длится не более 1—2 суток, строгий, генетически обоснованный прогноз паводков может быть дан с заблаговременностью менее 1 суток.

Увеличение заблаговременности, благодаря использованию прогноза погоды, повлечет за собой понижение точности результатов, с чем однако на практике приходится мириться.

в) Разработка методики предсказания паводков на реках Армянской ССР должна основываться на гидрографах стока, построенных по записям самописцев уровня.

Использование обычных речных данных не представляется возможным в силу значительных ошибок, получающихся при построении графиков отдельных паводков. Поэтому необходима организация постов с автоматической регистрацией уровня, хотя бы в основных створах на наиболее важных, с точки зрения народного хозяйства, реках.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 11 XI 1948.

* Е. В. Берг—Некоторые итоги исследований дождевого стока в лозах района Валдайской возвышенности. Тр. НИУ ГУГМС СССР, серия IV, вып. 17, 1945 г.

Ա. Ն. Աւանդ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԵՏԵՐԻ ԱՆՁՐԵՎԱՅԻՆ ՎԱՐԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՆԱԽԱՏԵՍՄԱՆ ՄԵՔՈՂԻԿԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Գետերի սեփականատեր, մասնավորապես անձրեային վարարումների նախատեսումը, հիդրոլոգիական ամենակարևոր պրոբլեմներից է:

Ներկա աշխատանքի նպատակն է նախորդ 10—15 տարիների ընթացքում հոսքի վրա եղած դիտողությունների հիման վրա Հայաստանի գետերի ամառային վարարումների սեփական ընտելացումը՝ նրանց նախատեսման մեթոդիկան դասելու համար:

Ստացված է ջրային միջին քանակով տարվա լրիվ հոսքի համեմատությամբ անձրեային հոսքի մեծություն քանակական ցուցանիշն ամառնրբացի դրանից ստացված է վարարման հոսքի և նրան առաջացնող տեղումների ծավալի հարաբերության ցուցանիշը, առանձին անձրևներից առաջացած մակարդակի բարձրացման տեղություն և բարձրության բնութագրեր:

Աշխատանքում նշված է վարարումների նախատեսման մեթոդիկայի ավելի ճիշտ ուղի և նրա զործնական կիրառության պայմանների դնահատումը:

Հետազոտությունը պարզել է, որ անձրևաչափման հիման վրա գննատելություն հիմնավորված նախատեսում հնարավոր է մեկ օրից պակաս ժամանակամիջոցի համար: Այդպիսի նախատեսման կանխորոշումը կախված է ջրհավաք ավազանում տեղումներից առաջացած ջրի հոսելու պայմաններից և տարրեր գետերի համար տարրեր է՝ շնորհիվ նրանց ավազանների բնույթի:

Աշխատանքը պարունակում է անձրեային վարարումների բազմամյա բնույթի վրա Հայաստանի առանձին շրջանների և գետերի ավազանների: Այդ անհրաժեշտ է մի շարք ժողովրդանահանական խնդիրներ լուծելու:

ГИДРОЛОГИЯ

А. Н. Важнов

Опыт применения метода М. А. Великанова к прогнозам
 дождевых паводков на малых реках

Основные зависимости

Прогноз дождевого паводка в основном состоит из предвычисления графика изменений расходов (гидрографа) по осадкам, выпавшим на поверхности водосбора. Как интервал времени, принимаемый при построении гидрографа, так и заблаговременность предвычисления зависят от размеров и особенностей данного водосбора, которые и определяют процесс разработки метода.

Предвычисленный гидрограф в той или иной форме сообщается потребителям для использования в народном хозяйстве.

При выборе основной зависимости расходов воды в интересующем нас замыкающем створе реки от осадков мы остановились на интегральном выражении, предложенном членом-корреспондентом АН СССР М. А. Великановым, [1] следующего вида:

$$Q_t = \int_0^{\tau=t} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} h_{t-\tau} e^{-K_1 \tau} d\tau, \quad (1)$$

в котором; Q_t — расход воды в замыкающем створе в момент времени t от начала дождя, $\frac{\partial \omega}{\partial \tau}$ — функция, выражающая изменение площади водосбора по времени добегания τ , отсчитываемого от $\tau = 0$ в замыкающем створе, до $\tau_{\max}$ в самых удаленных его точках; $h_{t-\tau}$ — интенсивность осадков, средняя на водосборе, для интервала времени $(t-\tau)$;

K_1 — коэффициент инфильтрации почвы, имеющий размерность: единица деленная на время;

e — основание натуральных логарифмов.

Функция $\frac{\partial \omega}{\partial \tau}$, в общем случае зависящая кроме времени добегания τ также и от времени t , не может быть выражена аналитически и потому должна быть представлена таблицей, в которой определенному интервалу $\Delta \tau_j$ соответствует некоторое значение $\Delta \omega_j$. Для

отражения изменчивости функции $\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = f(\tau)$ во времени таблицы должны быть получены для различных значений интенсивности дождя-основного фактора, определяющего эту изменчивость. Интенсивность дождя h также может быть выражена или в виде графика или в виде таблицы в некоторых конечных интервалах времени. В результате, вычисление интеграла в уравнении (I) заменяем суммированием по формуле:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \omega_j h_{i-j+1} e^{-k_i \tau_j} \quad (II)$$

где i — интервал времени t от начала дождя, j — интервал времени добегания τ , причем Δt и $\Delta \tau$ по абсолютной величине равны.

Вычисление значений функций $\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = f(\tau)$ для р. Касах у сел. Аштарак (Армянской ССР)

Предвычисление паводков по осадкам по вышеприведенной схеме проделано для р. Касах до с. Аштарак ($F=934 \text{ км}^2$).

При выборе реки мы руководствовались в основном двумя соображениями: а) наличием лимниграмм уровня воды и б) наличием достаточных метеорологических наблюдений.

По р. Касах до с. Аштарак мы имели лимниграммы за 1937 г.; наблюдения за осадками велись на 5 станциях и 5 постах. Расположение станций и постов не вполне удачно. Так, из 5 станций лишь 2 — Апаран и Аштарак — находятся внутри водосбора, а 3 остальные: Алагез в/г, Кошабулаг и Егвард расположены или на водоразделе, или вне водосбора. Что касается постов, то осадки по ним наблюдались менее точно, а время начала и конца дождя или вовсе не отмечалось, или отмечалось пределами обычных сроков наблюдений.

Для получения таблиц значений функций $\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = f(\tau)$ были построены системы изохрон-линий равного времени добегания для различных интенсивностей дождя, с учетом потерь на инфильтрацию. Всего было построено 4 системы изохрон для следующих типовых интенсивностей: 0,01 мм/мин., 0,05 мм/мин., 0,1 мм/мин. и 1,0 мм/мин., в часовых интервалах.

В основу построения была положена карта в изогипсах бассейна р. Касах, масштаба 1:25.000.

Порядок вычислений был принят следующий. На плане водосбора нормально изогипсам намечались вероятные пути овражного стекания осадков от водораздела до постоянных водотоков. Для каждого элементарного лога по заданной интенсивности дождя вычислялись расходы воды для ряда точек по длине лога, а по ним — сред-

ние скорости течения (формулы см. ниже), от которых уже не трудно было перейти и ко времени стекания.

Значения времени стекания были нанесены на план против соответствующих точек и по ним были проведены линии равного времени стекания через часовые интервалы. В результате была получена система изохрон добегаания по логам до постоянных русел.

Далее, в точках впадения сухих логов в русла надписывались значения расходов воды, которые суммировались от истоков основного русла к устью, и по полученным величинам, по соответствующим формулам были вычислены скорости течения в основном русле. По известным скоростям и расстояниям по длине русла было вычислено время добегаания по руслу и построена вторая система изолиний—система линий, равного времени добегаания до избранного замыкающего створа.

Таким образом полное время добегаания от любой точки бассейна складывается из 2-х частей: стекания по сухим овражкам и логам и стекания по постоянному руслу. В первой фазе стекание носит также струйчатый характер, но здесь шероховатость играет большую роль, и потери осадков также значительно больше, чем в руслах. Что касается плоскостного склонового стекания, то, как известно, оно имеет место на относительно незначительной длине склонов и практически его можно не выделять из струйчатого овражного стекания.

Рассмотрим формулы, использованные при вычислениях.

Скорости течения вычислялись по формулам:

для стекания по логам:

$$U = 2,6 q^{1/4} i^{1/2} \quad (III)$$

для русел

$$U = 3,8 q^{1/4} i^{1/2} \quad (IV)$$

Обе формулы получены в результате преобразования формулы Шези, при принятии постоянных по всей длине русла значений коэффициента шероховатости n по Маннингу, равным: для сухих логов 0.10 и для русел 0.06.

Значения коэффициента шероховатости получены по замеренным расходам на р. Касах и на соседних реках.

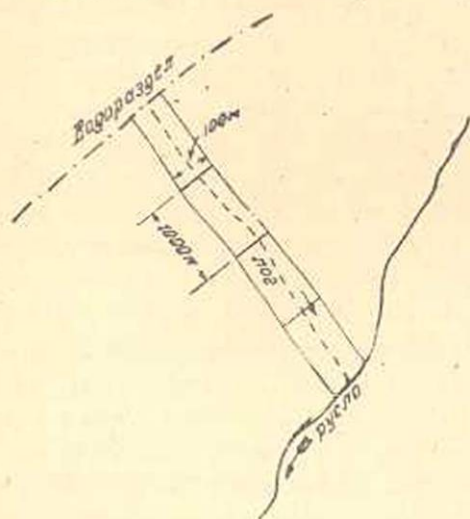
Попутно отметим, что рекомендованная М. А. Великановым [1] формула для Валдайского лога:

$$U = 4,4 q^{1/4} i^{1/2}$$

отличается величиной коэффициента в соответствии с меньшей шероховатостью ($n=0,05$).

Для вычисления расходов воды в сухих логам последние были

разбиты условно на участки длиной в 1000 м (см. черт. 1), начиная от водораздела и кончая устьем данного лога. Поступление воды



Черт. 1. Схематическое деление лога при вычислении расхода дождевого стока.

в замыкающий створ каждого участка, очевидно, складывается из притока с вышележащего участка, по руслу и стекания со склонов лога, примыкающих к данному участку русла. При этом, как объем воды, поступившей по руслу, так и объем стока по склонам должны быть уменьшены на величину потерь на инфильтрацию.

Математически расчет расходов воды в замыкающих створах отдельных участков выражается следующей формулой:

$$q_i = h f_i + q_{i-1} e^{-2,5 K_0 t_{i-1}} \quad (V)$$

где q_i — расход воды в замыкающем створе i -той от водораздела площадки,

q_{i-1} — расход с вышерасположенной площадки,

h — принятая постоянная интенсивность дождя,

f_i — площадь элементарной площадки,

K_0 — наименьшее значение коэффициента инфильтрации для данной почвы в насыщенном состоянии,

t_{i-1} — время стекания по вышерасположенной площадке,

e — основание натуральных логарифмов.

Полученные описанным способом системы изохрон планиметрировались, в результате чего составлены таблицы площадей вида табл. 1, которые и послужили основанием для расчета паводков.

Учет потерь осадков на инфильтрацию

В подынтегральном выражении уравнения (I) коэффициент K_1 , характеризующий инфильтрационную способность данного рода почвы, в общем случае должен рассматриваться переменным во времени. Величина K_1 варьирует в зависимости от структуры верхнего почвенного слоя, задернованности, состояния растительного покрова, но главным образом в зависимости от напитанности почвы предшествующими дождями. Последняя, как известно, резко меняется в

Таблица 1

Таблица площадей бассейна р. Кзсах до с. Аштарак (в км²)

Интенсивность дождя 0.1 мм/мин

$$K_0 = 0.5 \frac{1}{\text{час}}$$

Время пробега по руслу до замык. створа в часах.	Время добегания по склону в часах							Площади между изохронами до замык. створа в км ²
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	
0-1	11							11
1-2	18	4						22
2-3	20	10	4	2				36
3-4	40	8						48
4-5	52	16						68
5-6	72	18						90
6-7	78	20	3					101
7-8	64	24	10					98
8-9	50	25	10					85
9-10	48	18	4	2				72
10-11	29	22	8	3				62
11-12	35	18	6	1				60
12-13	35	18	2					55
13-14	27	12	4	1				44
14-15	8	7	4	4				23
15-16	5	4	3	3	2	—	—	18
16-17	2	2	2	4	4	2	—	16
17-18	—	3	1	3	5	3	1	16
18-19	—	—	1	1	4	5	4	15
19-20						1	3	4

течение данного непрерывного дождя. Поэтому величину K_1 удобно выражать в функции времени, отсчитываемого от начала паводкообразующего дождя.

Для выражения функции $K_1 = f(t)$ на основании экспериментальных данных по инфильтрации почв, была подобрана приближенная зависимость, достаточно гибкая, чтобы отразить изменчивость потерь во времени.

Как известно, интенсивность инфильтрации очень высокая в первый момент, резко убывает в течение дождя, стремясь к некоторому наименьшему для данной почвы пределу, после чего, при продолжающемся дожде, остается постоянной. Изменение коэффициента K_1 , естественно, подчиняется тому же закону.

Момент перехода K_1 к постоянному пределу, даже для одного и того же рода почвы, будет меняться в зависимости от степени увлажнения почвы перед дождем.

В условиях Армении, где имеют большое распространение сильно фильтрующие породы, начальные значения коэффициента, очевидно, будут особенно высоки.

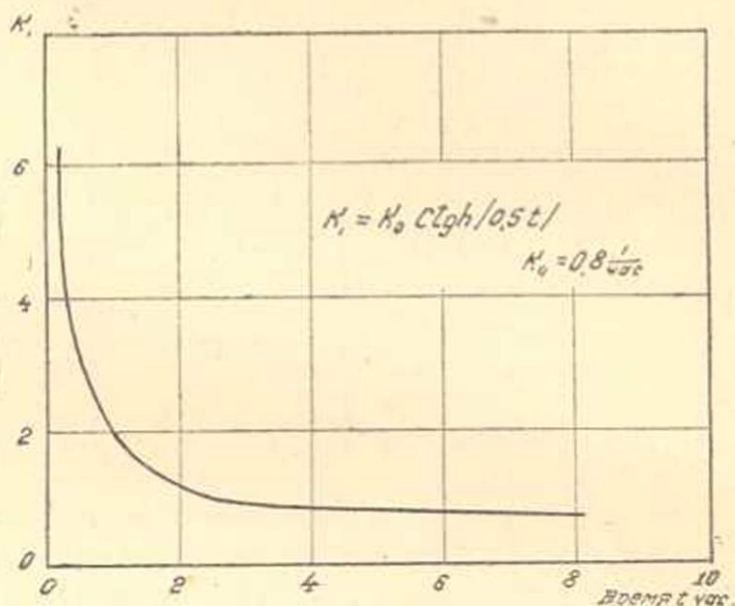
Исходя из сказанного, нами подобрано следующее выражение для K_1 :

$$K_1 = K_0 \operatorname{ctgh}(zt), \quad (\text{VI})$$

где t — время от начала дождя; K_0 — постоянное для данной почвы наименьшее значение коэффициента;

α — параметр, определяющий момент перехода от переменных значений K_1 к его постоянному значению.

На черт. 2 показана кривая гиперболического котангенса при $\alpha = 0,5 \frac{1}{\text{час}}$, что соответствует переходу коэффициента инфильтрации K_1 к постоянному его значению, спустя 4 часа от начала дождя, так как $Ctgh(\alpha t)$ уже при $(\alpha t) = 2$ практически равен единице.



Чертеж 2. Кривая зависимости коэффициента инфильтрации от времени.

Практическое полевое определение параметров K_0 и α может быть осуществлено в результате дождевания малых прямоугольных площадок с однородными почвенными и морфологическими характеристиками. При заданной интенсивности дождевания, известных размерах и уклоне площадки и замеренном расходе у нижней кромки площадки можно вычислить интенсивность инфильтрации, а затем параметры α и K_0 , пользуясь уравнением (I), упрощенным применительно к данному случаю.

При расчетах для р. Касак были использованы имевшиеся в литературе материалы и по ним определены приближенные значения K_0 и α для нескольких родов почв:

Водосбор Касаха, на преобладающей части до створа у Аштарак занят черноземовидными почвами на суглинках и наиболее вероятные значения K_0 — от $0,5 \frac{1}{\text{час}}$ до $1,0 \frac{1}{\text{час}}$.

	K_0	α
1. Песчано-глинистая почва (по данным ЦИП)	$0,2-0,3 \frac{1}{\text{час}}$	—
2. Чернозем (по данным ЦИП)	$0,8-0,9$	—
3. Тяжело-суглинистая почва (ВНИИЛХ)	$0,4$	1,2
4. Техасский чернозем (по данным США)	$0,6-1,0$	2,0
5. Глина, поверхность задерживаема (по данным США)	$0,8-0,6$	1,0

Вычисления гидрографов паводков р. Касах по осадкам

Для того, чтобы оценить точность предвычисления паводков по вышеприведенным зависимостям были использованы наблюдения за осадками в течение лета 1937 года. За этот период имелось около 20 гидрографов, построенных по лимниграммам в часовых интервалах.

Для вычисления ординат гидрографа паводка по основным формулам:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \omega_j h_{i-j+1} e^{-K_0 \tau_j}$$

$$K_1 = K_0 \operatorname{ctgh} (\alpha t_{i-j+1}) \quad (\text{VII})$$

интенсивность дождя вычислялась следующим образом.

Суммы осадков для каждого дождя, с указанием начала и конца его, с точностью до 14 часа, по пяти станциям и двум постам, наиболее характерным для водосбора р. Касах до с. Аштарах, были выписаны в специальную таблицу. Для каждого дождя вычислено среднее по территории время начала и конца его и, следовательно, средняя продолжительность. Для каждой станции, далее, вычислялась средняя интенсивность осадков в течение дождя, которая помещалась на вес данной станции, определяемый тяготеей к ней площадью водосбора; сложение результатов по всем станциям дало среднюю интенсивность для всего водосбора. Средняя длительность дождя для удобства дальнейших вычислений округлялась до целого часа.

Значения параметров K_0 и α , согласно предыдущему, для условий преобладания черноземовидных почв бассейна Касаха, окончательно нами приняты: $K_0 = 0,8 \frac{1}{\text{час}}$ и $\alpha = 0,5 \frac{1}{\text{час}}$, что хорошо совпадает с данными М. А. Великанова [2]. Значение $\alpha = 0,5 \frac{1}{\text{час}}$ показывает,

что в условиях бассейна Касаха при интенсивном высыхании почвы между дождями и большой трещиноватости пород нижний предел инфильтрационной способности наступит не раньше, чем через 3—4 часа от начала дождя.

После подстановки значений параметров основные расчетные формулы получают следующий вид:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \omega_j h_{j-j+1} e^{-k_i t_j}$$

$$K_i = 0,8 \operatorname{Ctgh} (0,5 t_{i-j+1}), \quad (\text{VIII})$$

где индекс i — означает номер часа, отсчитываемого от начала дождя, для которого вычисляется секундный расход воды в замыкающем створе, а индекс j — номер часовой изохроны, площадь до которой участвует в формировании расхода. В соответствии с величиной средней интенсивности дождя h выбирается та или иная система изохрон, вернее, соответствующая ей таблица площадей.

Потери учитывались только в фазе стекания по сухим логом до русел.

Гидрографы, вычисленные с учетом грунтового стока для 20 случаев дождей за лето 1937 года, были нанесены на графики фактических паводков, построенные по лимниграммам; там же были нанесены и графики паводков, построенные по обычным 3-срочным уровенным наблюдениям (черт. 3). Составлены также таблицы сравнения вычислений максимальных расходов и объемов паводков с фактическими величинами (табл. 2 и 3).

Средняя ошибка объемов паводков, вычисленная по данным таблиц 2 и 3, составила $\pm 29\%$ от величины объемов, а для максимальных расходов она равна $\pm 25,4\%$, в то время как ошибки величины, вычисленных по фактическим же, но речным наблюдениям, в сравнении с точными лимниграфными, соответственно составили $\pm 45\%$ и 58% . Другими словами, точность вычислений по формулам в 2—2,5 раза выше точности фактических речных наблюдений.

Если ошибки вычислений по формулам относить не к абсолютным величинам расходов или объемов, а к расчетным амплитудам, как то принято делать в гидрологических прогнозах, то получим следующие результаты:

а) при амплитуде максимальных расходов около 60 м³/сек (см. табл. 2) для 10 первых паводков ошибки не превышают 8—9%, а лишь в одном случае ошибка равна 37%;

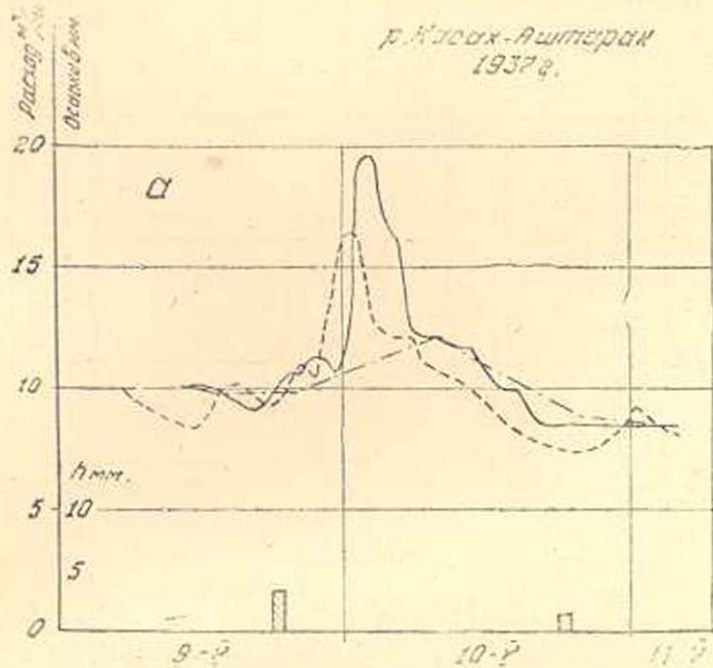
б) для объемов паводков в 10 случаях из 11 ошибки не превосходят 12% от амплитуды и лишь в одном случае ошибка равна 23%.

Полученные результаты с практической точки зрения являются вполне удовлетворительными.

Обратимся теперь к графикам 3, 4 и 5. Несовпадение вычисленных гидрографов с фактическими выражается в следующем:

а) рассчитанный пик наблюдается на 1—3 часа позже фактического;

б) кривая подъема у рассчитанных паводков положе, чем у фактических и потому общая продолжительность паводка несколько преуменьшена.



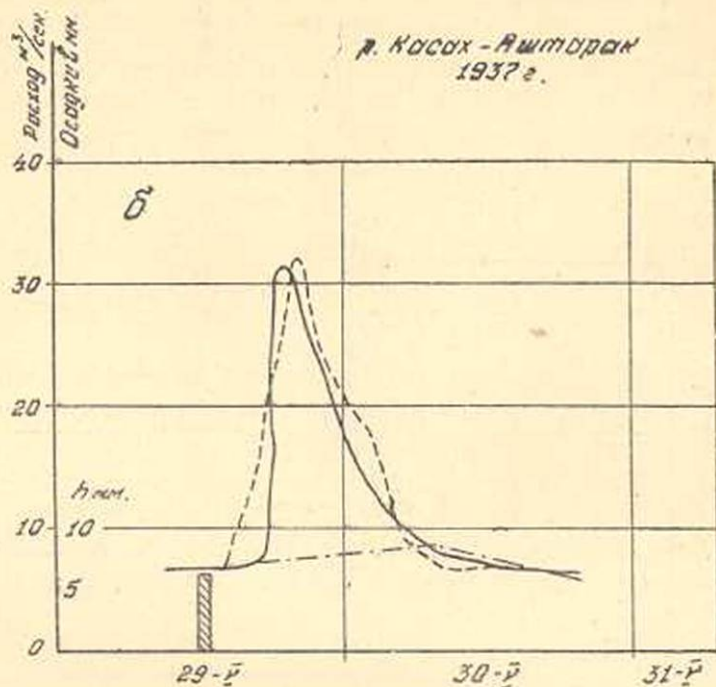
Чертеж 3 а. Гидрографы дождевых паводков
р. Касах у с. Аштарак.

— Фактические по лимниграфу,
- - - - - вычисленные по формулам,
- . - . - вычисленные по речным наблюдениям.

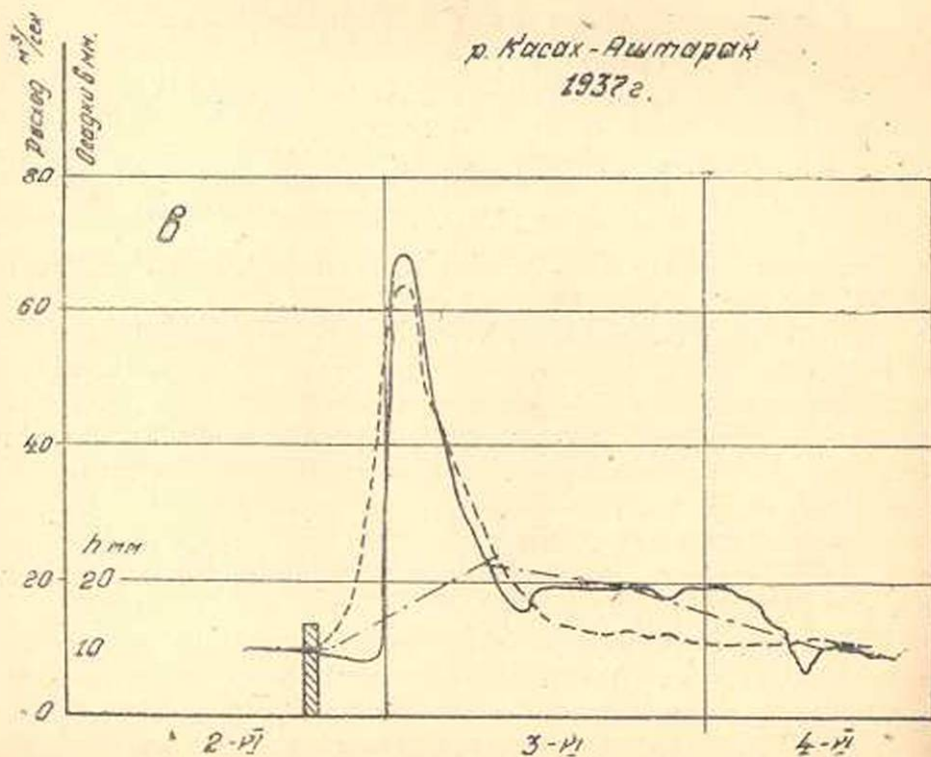
Указанные расхождения легко объяснить, исходя из закономерностей развития и движения паводочной волны.

Первые два отклонения являются результатом воздействия русел на форму паводка, которое сказывается в некотором замедлении продвижения фронта волны по сравнению с гребнем, при движении ее по частично сухому руслу с повышенной шероховатостью. В результате этого кривая подъема становится круче, а пик сдвигается к передней части. Опоздывание начала подъема объясняется также и повышенной инфильтрационной способностью почвы в начале дождя, в результате чего первые порции осадков полностью уходят в почву.

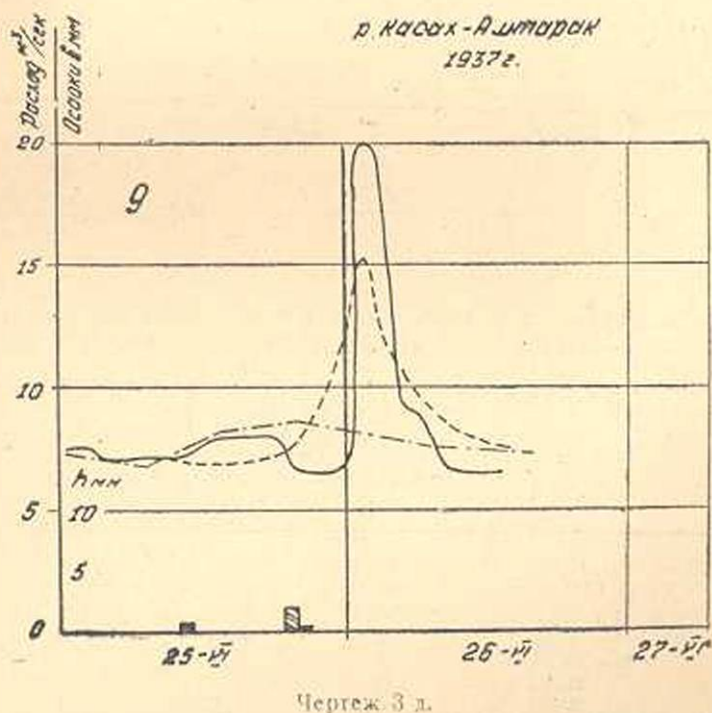
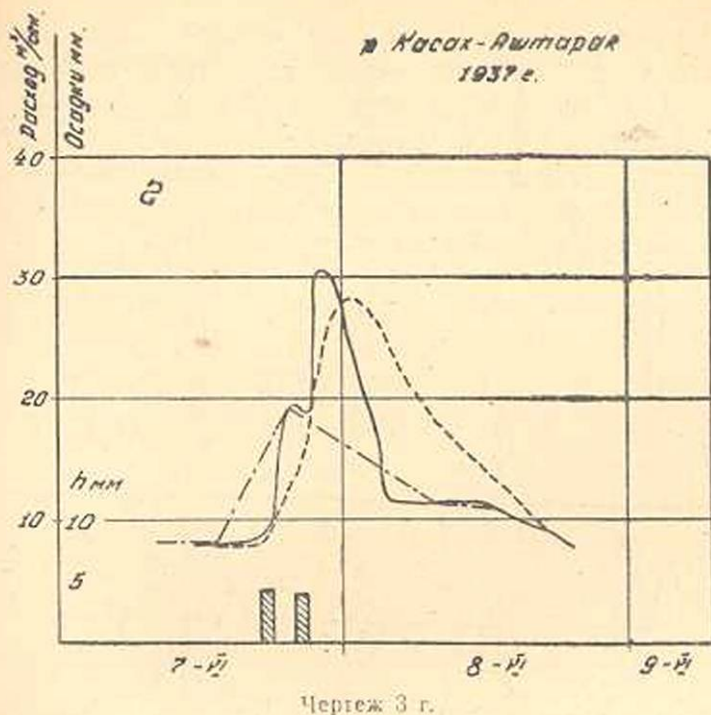
Последнее отклонение объясняется регулирующим воздействием поверхности водосбора и русел, в результате чего часть воды задерживается или в виде, так называемого, «внутрипочвенного стока», или русловой емкостью, и присоединяется к паводку на глубоком спаде.



Чертеж 3 б.

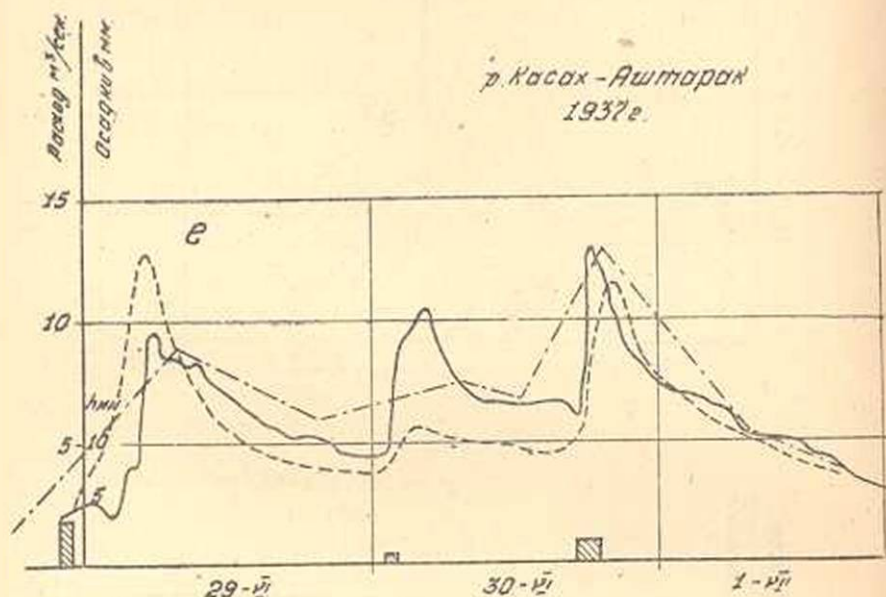


Чертеж 3 в.



Явление „внутрипочвенного стока“, которое неоднократно отмечалось в работах, например, Валдайской гидрологической станции, очевидно, имеет место и в нашем случае.

Если сопоставить время выпадения осадков с моментом прохождения пика соответствующего паводка, то интервал между ними составляет 6—10 часов в условиях такого водосбора, как бассейн р. Касах, площадью 945 км². Время, необходимое для составления самого прогноза в среднем равно 3/4 часа. Таким образом заблаговременность прогнозов пиков для р. Касах до с. Аштарак для обобщенных дождей не превосходит 5—9 часов.



Чертеж 3 е.

Таблица 2

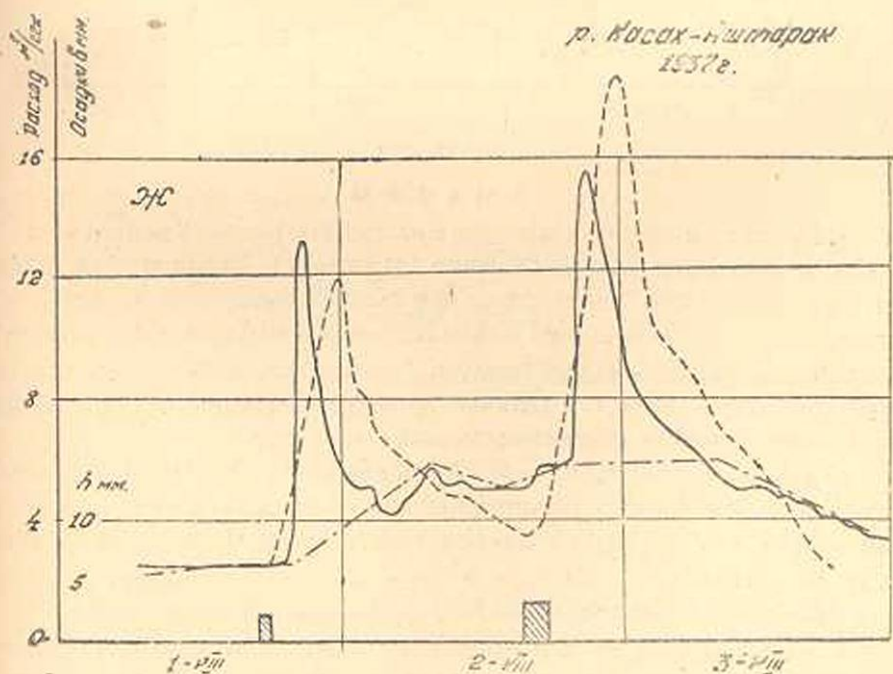
Сравнение максимальных расходов паводков, вычисленных по формуле, с фактическими по лимниграфу р. Касах—с. Аштарак

№ п/п	Дата	Максимальный расход в м³/сек.		Ошибки Q _{пик} в м³/сек.	Ошибки в % к расходу
		Вычисленный.	Фактический.		
1	1937 г. 9—10/V	16,5	19,5	—3,0	15,4
2	29—30/V	32,0	31,5	+0,5	1,6
3	2—3/VI	63,5	68,0	—4,5	6,6
4	7—8/VI	28,5	30,5	—2,0	6,6
5	25—26/VI	15,0	20,0	—5,0	25,0
6	29/VI	13,0	9,5	+3,5	36,9
7	30/VI	5,5	10,5	—5,0	47,6
8	30/VI—1/VII	11,5	13,0	—1,5	11,5
9	1—2/VIII	12,0	13,0	—1,0	7,7
10	2—3/VIII	18,5	15,5	+3,0	19,3
11	15—16/VIII	38,0	60,0	—22,0	36,7

Таблица 3

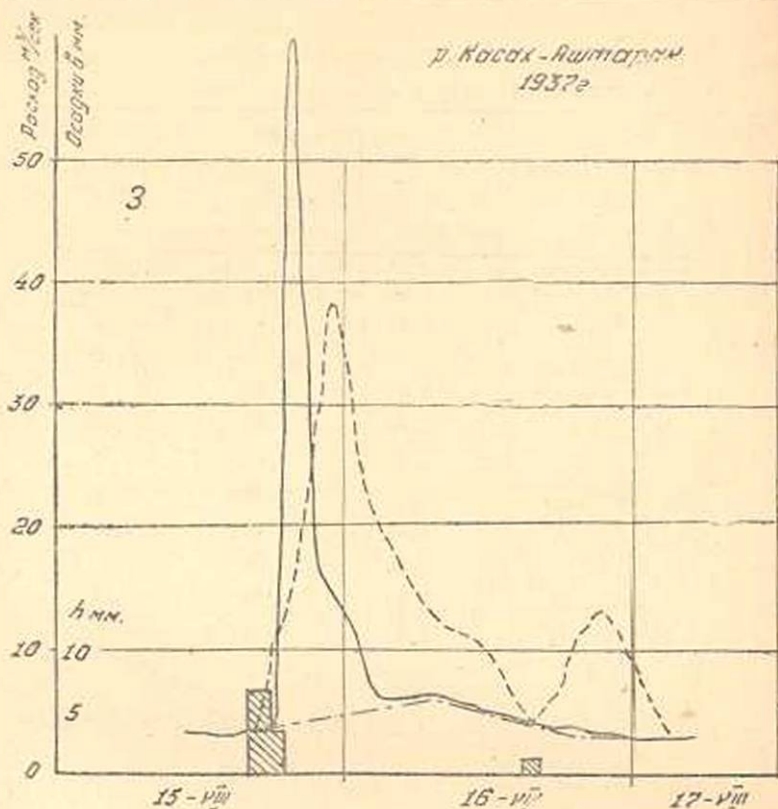
Сравнение объемов паводков, вычисленных по формуле, с фактическими по лимниграфу р. Касах—с. Аштарах

№	Дата	Объем паводков в милл. м ³		Ошибки в милл. м ³	Ошибки в % к величине объема
		Вычислен- ный	Фактиче- ский		
1	1937 г. 9-10/V	4,05	5,01	-0,99	19,6
2	29-30/V	6,84	6,12	+0,72	11,8
3	2-3/VI	20,3	20,5	-0,18	0,9
4	7-8/VI	8,64	6,48	+2,16	33,4
5	25-26/VI	2,88	2,61	+0,27	10,3
6	29/VI	3,78	3,28	+0,50	15,2
7	30/VI	1,30	2,43	-1,13	46,5
8	30/VI-1/VII	4,14	4,76	-0,62	13,0
9	1-2/VIII	2,95	2,55	+0,40	15,6
10	2-3/VIII	5,54	4,46	+1,08	24,2
11	15-16/VIII	11,4	7,20	+4,20	58,4



Чертеж 3 ж.

При хорошо поставленной информации об осадках прогнозы такой заблаговременности могут иметь большое практическое значение.



Чертеж 3 в.

Выводы

1. Прогноз дождевых паводков на горных реках Армянской ССР, на основе изучения взаимодействия стекающих осадков с подстилающей поверхностью земли, даже при существующем не вполне удовлетворительном размещении гидрометеорологической сети, является практически вполне осуществимым. Необходимым условием для выпуска прогнозов является наличие прямой телефонной связи метеорологических пунктов с прогностическим центром.

2. Генетический метод М. А. Великанова отражает основные закономерности процесса формирования паводков и представляется правильным и практически приемлемым. Преимущество метода Великанова заключается также и в том, что он открывает перспективы дальнейшего исследования природы паводков вообще.

3. Разработка и проверка метода вполне подтвердили правильность новой схемы учета влияния потерь на инфильтрацию на форму и размеры паводка, предложенной Великановым. Потери осадков должны рассматриваться в функции от времени стекания. Коэффициент инфильтрации K_i меняется в течение дождя, переходя от больших значений в начале, к малым устойчивым значениям спустя 2—4 часа.

4. Для выражения изменчивости коэффициента инфильтрации с

течением времени, в специфических условиях Армении, нами рекомендуется зависимость вида:

$$K_1 = K_0 \operatorname{ctgh} (\alpha t),$$

которая вполне оправдала себя в условиях р. Касах. Параметры K_0 и α для различных почвенно-геологических условий могут быть получены в результате полевых экспериментов.

5. Для водосборов площадью от нескольких сот до нескольких тысяч км², аналогичных бассейну р. Касах, при построении системы изохрон добегаания, плоскостное стекание можно не отделять от стекания по логам, так как оно происходит на сравнительно небольшой длине склонов и существенного влияния на общее время добегаания не оказывает. Так как изъятие воды на инфильтрацию в фазе стекания по склонам и сухим логам дает наибольшую долю общих потерь осадков, вычисление скоростей стекания при построении системы изохрон должно производиться с учетом этих потерь.

6. Совершенствование методики прогноза дождевых паводков должно идти по двум направлениям:

а) по пути развития и обогащения метеорологических и гидрологических наблюдений, и

б) по пути исследования природы инфильтрации осадков и законов трансформации паводковой волны под влиянием рельефа, геологии и русловой сети бассейна.

Оба эти фактора являются определяющими в паводкообразовании.

Поступило 7 XII 1948.

Водно-Энергетический Институт
Академии Наук Армянской ССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Великанов — Прогнозирование дождевых паводков для малых бассейнов. ДАН Арм. ССР, IV, вып. 1, 1946.
2. М. А. Великанов — Теоретические основы предвычисления гидрографа дождевого паводка. „Метеорология и Гидрология“ № 1, 1948.

Ա. Ն. Վաճճյան

ՓՈՔՐ ԳԵՏԵՐԻ ԱՆՁՐԵՎԱՅԻՆ ՎԱՐԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՊՐՈԳՆՈԶԻ
ՀԱՄԱՐ Մ. Ա. ՎԵԼԻԿԱՆՈՎԻ ՄԵԹՈԴԻ ԿՐԱՌՄԱՆ ՓՈՐՁԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հեղինակն իրեն նպատակ է դրել մշակել Հայաստանի բնության գետերի անձրևային վարարումների պրոգնոզի մեթոդը՝ հիմնված Մ. Ա. Վելիկանովի բնական տեսական սխեմայի վրա: Ամառային վարարումների պրոգնոզները հիմնվում են հիդրոմետեոլոգիայի տեղումների մասին ստաց-

ված տեղեկությունների վրա: Այդ պրոպոզիցիաները հիմնականում անհրաժեշտ են հիդրոէներգետիկայի համար:

Մ. Ա. Վելիկանովի սխեմայի կիրառությունը պահանջեց մի շարք այլ հարցերի մշակում, որոնցից հիմնականները հետևյալներն են. 1. տեղումներից առաջացած ջրերի անցման իզոթերմների կառուցման ձևի մշակումը, 2. կորուստների փոփոխականության հետազոտումը և կորուստների ինտենսիվություն, որպես հոսելու ժամանակի ֆունկցիայի անալիտիկ արտահայտությունը, 3. հազի ինֆիլտրացիայի գործակիցների բնորոշությունը:

Աշխատանքում արված է տեղումներից առաջացած ջրի անցման ժամանակը հաշվելու նոր սխեմա մինչև 1000 քառ. կմ ջրահավաք մակերևւոյթի ցանկացած կետի համար և իզոթերմների սխեմայի կառուցումը չոր կլիմայի և դետերի նոսր ցանցի պայմաններում:

Հոսքի կորուստների հետազոտությունը ցույց տվեց, որ ինֆիլտրացիայի գործակիցն անձրևի ընթացքում պետք է դիտվի որպես փոփոխական և փոփոխականություն լավագույն արտահայտություն հանդիսանում է հիդրոբոլիկ կոտանգենտի օրենքը: Ինֆիլտրացիայի գործակիցը հաշվելու բանաձևի համար որոշված են պարամետրները:

Քառախ դետի օրինակի վրա մեթոդի ստուգումը տվեց բավարարարդյունք: Բանաձևով հաշված վարարման հիդրոգրաֆը լիմիդրաֆով կառուցած իրական հիդրոգրաֆների հետ համեմատելիս 11 դեպքից 10-ում մաքսիմալ ելքի սխալները վարարման ժամանակ ելքի փոփոխման ամպլիտուդի 8—9% էից ավելի չէին, իսկ վարարումների ծավալի համար՝ 12% չզերազանցեցին:

Թե մեկ և թե մյուս դեպքում արդյունքները բավարարում են պրոպոզիցիայի պայմաններին, այսպիսով հնարավոր է մեթոդիկան հաջողությամբ կիրառել Հայաստանի դետերի համար կարճատև պրոպոզիցիայի:

