

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ-ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ.
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԿՄՐԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒՆԳՐԱ

Աղոնց Հ. Տ. (*պատ. խմբագրի տեղ.*), Անանյան Ա. Ն., Գասարյան Ա. Մ., Աղիազարյան Ի. Վ., Կասյան Մ. Վ., Խոսրովերդյան Վ. Մ., Նուգարով Ա. Դ. (*պատ. խմբագրի*), Սխեմով. Մ. Չ., Փինաջյան Վ. Վ. (*պատ. քարտուղար*)։

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Абонц Г. Т. (зам. отв. редактора), Анания А. К., Гаспарян А. М., Егиазаров И. В., Касьян М. В., Назаров А. Г. (отв. редактор), Пинаджян В. В. (отв. секретарь), Симонов М. Э., Худавердян В. М.

О. М. АЙВАЗИՆ

СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНЫХ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ НА УЧАСТКАХ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ*

В гидротехнических сооружениях и в природе движение жидкости часто сопровождается отрывом потока от стенок или дна русла. Отрыв потока приводит к образованию в освободившихся пространствах русла нетранзитных масс жидкости, не участвующих в основном поступательном движении. Эти массы совершают движение типа вращательного. В отличие от них основной поток на участках отрывного течения называют транзитным. В гидротехнических сооружениях явление отрыва особенно ярко проявляется в нижних бьефах, в межшпорных пространствах, во всякого рода пьезах и донных траншеях, на всевозможных местных сопротивлениях.

В гидравлической и гидротехнической литературе упомянутые нетранзитные массы фигурируют под разными названиями, но наиболее приняты „валец“—для обозначения масс с горизонтальной осью, „водоворот“—для обозначения масс с вертикальной осью и „застойная зона“—для обозначения масс, ориентированных любым образом.

На движение нетранзитных масс жидкости затрачивается энергия основного, транзитного потока. Именно, на поддержание этого движения рассеиваются огромные количества кинетической энергии в нижних бьефах гидротехнических сооружений. Тем же, в основном, объясняется рассеивание энергии на местных сопротивлениях. Таким образом, *участкам отрывного течения принадлежит особая роль в рассеянии энергии потока.*

Рассматриваемым участкам свойственно также совершенно своеобразное распределение скоростей. Знание этого распределения во многих случаях является необходимым условием рационального проектирования.

Отмеченные обстоятельства, а также ряд других, обуславливают тот большой интерес, который проявляется инженерами и исследователями к участкам отрывного течения. Однако, свойства движения на указанных участках до сих пор еще мало изучены. Совершенный гидравлический прыжок также относится к рассматриваемой категории

* Доложено в мае 1956 г. в Москве на юбилейной научной конференции МНИВХ имени В. Р. Вильямса.

движений хотя и причины возникновения нетранзитных масс в этом случае иные, чем отрыв потока от стенок. Одновременно он является наиболее изученным из рассматриваемых случаев движения, и несмотря на это, в обширной литературе по совершенному гидравлическому прыжку нет единства мнений ни в вопросе механизма рассеяния энергии, ни в вопросе кинематической структуры.

Отсутствие доказанных представлений о свойствах движения на рассматриваемых участках приводит нередко к совершенно произвольным допущениям при теоретических построениях. Отсутствие методов непосредственного учета рассеивания энергии на таких участках ограничивает оперативные средства гидравлики как при теоретическом рассмотрении ряда вопросов, так и при практических расчетах.

В связи с вышесказанным, нами проведено экспериментальное исследование, целью которого являлось получение сведений о кинематической структуре, характере взаимодействия, механизме рассеяния энергии и некоторых других сторонах движения на участках отрывного течения.

Нами исследованы три случая плоского движения с возникновением нетранзитных масс, вследствие отрыва:

1. Движение на участке донного углубления прямоугольной формы, расположенного нормально к потоку (рис. 1а).
2. Движение на участке вертикальной прямоугольной шахты, расположенной нормально к потоку (рис. 1б).
3. Движение за уступом, расположенным нормально к потоку (рис. 1в).

Условимся перечисленные три случая движения сокращенно называть случаями 1а, 1б, 1в.

Опыты по всем трем схемам проводились в гидравлической лаборатории МИВХ, в стеклянном лотке с горизонтальным дном и шириной равной 24,5 см. Расходы, местные скорости и отметки воды

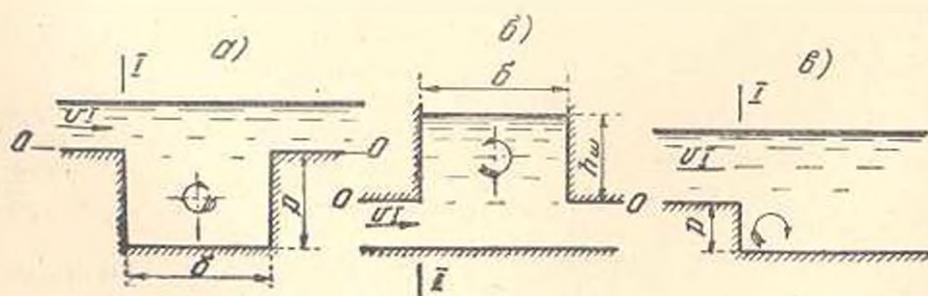


Рис. 1. Рассмотренные случаи плоского движения.

измерялись обычными способами. Наиболее важные условия, при которых проводились опыты по указанным трем схемам, приведены в таблице 1, в которой приняты следующие обозначения:

p —высота углубления, уступа, высота столба воды в шахте;

Таблица 1

№№ п. п.	ρ см	δ см	$\frac{\delta}{\rho}$	Q л/сек	h_1 см	v_1 м/сек	Re_1	F_r	α_1	α_2
1	20,6	23,4	1,13	9,46	2,94	1,31	23970	5,98	1,01	1,05
2	20,6	23,4	1,13	8,50	3,16	1,09	21230	3,89	1,00	1,03
3	20,6	23,4	1,13	9,20	2,37	1,60	24000	11,00	1,01	1,05
4	20,6	23,4	1,13	6,70	1,79	1,53	18030	13,31	1,00	1,03
5	20,5	20,5	1,0	22,25	5,76	1,60	48900	4,50	1,03	1,07
6	20,5	20,5	1,0	13,00	2,49	0,708	27200	0,68	—	—
7	20,5	20,5	1,0	27,00	6,90	1,10	56800	4,42	1,00	1,01
8	15,5	20,5	1,32	26,00	5,82	1,82	57900	5,82	1,00	1,04
9	20,51	30,0	1,46	20,10	4,50	1,52	51700	7,52	—	—
10	20,54	102,25	5,0	11,20	13,88	0,33	17150	0,03	—	—
11	20,54	30,0	1,46	15,00	4,51	1,41	38300	4,70	1,02	1,07
12	20,54	30,0	1,46	13,20	4,50	1,10	32300	3,31	1,01	1,13
13	20,54	30,0	1,46	24,30	7,05	1,40	51000	2,87	1,00	1,05
14	20,54	30,0	1,46	22,00	11,71	0,94	41000	0,70	—	—
15	10,0	30,0	3,0	26,00	4,92	2,16	62250	9,75	1,00	1,02
16	10,0	16,0	1,6	10,75	3,82	1,15	—	3,52	—	—
17	10,0	30,0	3,0	—	3,82	—	—	1,80	—	—
18	10,0	00,0	0,0	—	3,82	—	—	0,07	—	—
19	10,0	—	—	28,30	12,74	0,94	48000	0,707	—	—
20	10,0	—	—	26,00	10,33	1,02	46800	1,04	—	—
21	10,0	—	—	13,00	7,50	0,70	27000	0,68	—	—

δ —протяженность углубления шахты;

h_1 , v_1 , Re_1 , F_r — соответственно глубина, средняя скорость, число Рейнольдса и число Фруда в сечении 1—1 (сечение отрыва).

Вначале был исследован случай „1а“.

Как видно из таблицы 1, условия опытов, посвященных этому случаю, изменялись в довольно широких пределах. Так, геометрическая характеристика углубления $\frac{\delta}{\rho}$ изменялась от 1 до 5, число Re_1 от 17000 до 62000, число F_r от 0,08 до 13,31.

Визуальные наблюдения над движением чистой воды дали лишь представление о возможных формах свободной поверхности потока над углублением. Эти формы сводятся к следующим:

1. При $F_r < 1$ движение над углублением сохраняет черты плавноизменяющегося, свободная поверхность имеет форму кривой спада.

2. При $F_r > 1$ могут иметь место три случая:

а) движение сохраняет черты плавноизменяющегося, свободная поверхность имеет форму кривой подпора;

б) движение сопровождается возникновением одной устойчивой волны над углублением (рис. 3);

в) движение сопровождается возникновением ряда неустойчивых волн над углублением.

Дальнейшие визуальные наблюдения сопровождались применением окрашивающих растворов и механических примесей. Было обнаружено, что углубление, по крайней мере при значениях $1 < \frac{\delta}{\rho} < 3$,

оказывается занятым полностью как по длине, так и по высоте циркулирующей нетранзитной массой жидкости*. При дальнейшем увеличении отношения $\frac{z}{r}$ сначала происходит уменьшение высоты циркулирующей нетранзитной массы по направлению движения, а затем наступает момент, когда она занимает углубление лишь на части его длины**.

Введение в циркулирующую массу красящего раствора привело к образованию долго державшейся вращающейся туманности (рис. 2). Это, при имевших место больших скоростях вращения, озна-

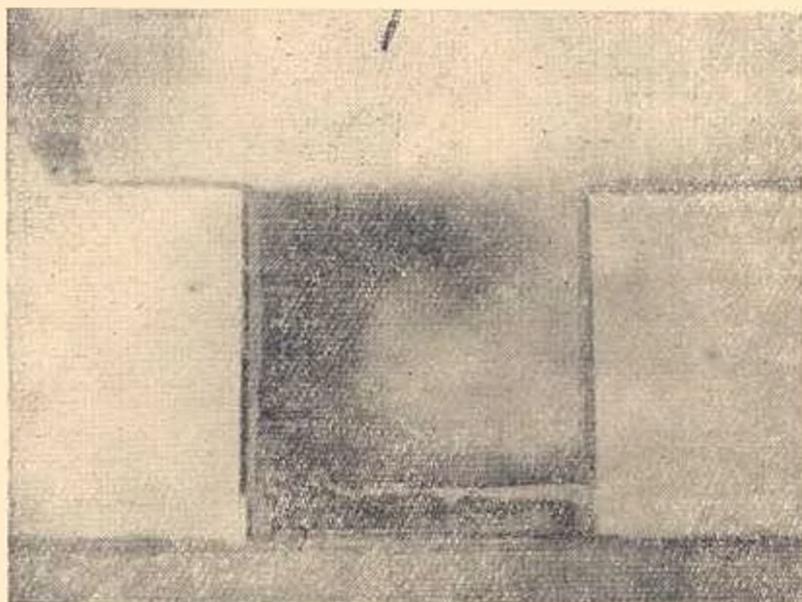


Рис. 2. Образование вращающейся туманности.

чало, что между циркулирующей массой и транзитным потоком отсутствует обмен, сравнимый с расходом циркуляции и обмен сосредоточенными массами вообще. В то же время постепенное осветление туманности говорило о наличии турбулентного обмена. О том же говорило движение взвешенных предметов и примесей. Крупные шарики и предметы ($d=3-4$ см) пребывали в циркулирующей массе, совершая совместное вращение в течение длительного времени (от начала до конца опыта)—это доказывало отсутствие обмена сравнимого с расходом циркуляции, обмена сосредоточенными массами, ибо в обратном случае плавающие тела были бы вынесены немедленно, неза-

* Здесь уместно указать, что в [1] не только не отмечается наличие вращательного движения в описываемом случае, но и вообще отрицается наличие в углублении какого-либо движения.

** Более подробно этот вопрос рассмотрен ниже.

висимо от их размера. Наоборот мелкие примеси (например опилки) с течением времени целиком выносятся из циркулирующей массы, подобно тому, как с течением времени исчезали туманности, возникшие после подкрашивания. Это доказывало наличие турбулентного обмена и объяснялось тем, что примеси по своим размерам были такого же порядка, что и моли турбулентного обмена.

Таким образом уже на этой стадии опытов оказалось возможным заключить, что *движение нетранзитной массы является замкнуто-циркуляционным обмен, имеющий место между транзитным потоком и циркулирующей массой, является турбулентным обменом и, что схематизация движения нетранзитной массы в виде петли (2-1), равносильная допущению сосредоточенного обмена, равного циркуляционному расходу, является ошибочной.* Является совершенно ошибочным также встречающееся в литературе [2] противопоставление движения с турбулентным обменом между нетранзитной и транзитной зонами потока движению с замкнуто-циркулирующей нетранзитной массой. Эти два вида движения не отрицают, а наоборот взаимно обуславливают друг друга. Действительно, если бы обмен между транзитным потоком и нетранзитной массой не носил турбулентного характера, то не могло быть и замкнуто-циркуляционного движения последней и мы имели бы дело с петлей Гридука [2]. С другой стороны, только при замкнуто-циркуляционном движении нетранзитной массы единственно возможной формой обмена между рассматриваемыми частями потока является турбулентный обмен.

Задачей дальнейших опытов явилось нахождение зоны, в которой происходит, установленный предыдущими опытами, турбулентный обмен. Эту задачу удалось выполнить посредством поочередной визуализации транзитного потока и циркулирующей массы.

То, что было обнаружено во время опытов, поясним с помощью фотоснимков, приведенных на рис. 3а, б, в. На рис. 3а приведен фотоснимок движения после введения красящего раствора в циркулирующую массу. Фотоснимок вызывает недоумение, ибо оставляет такое впечатление, как будто жидкость только выносится из циркулирующей массы, не поступая в него. Мы видим четко очерченную границу окрашенной и светлой частей потоков. На этой границе мы не обнаруживаем никаких нарушений, которые показывали бы, что из транзитного потока поступают порции чистой воды взамен вынесенных из циркулирующей массы. Рассмотрим теперь фотоснимок, приведенный на рис. 3б. На нем показано то же движение, с той лишь разницей, что на этот раз покрашена не циркулирующая масса, а транзитный поток. Этот фотоснимок также вызывает недоумение, так как оставляет такое впечатление, что жидкость только поступает в циркулирующую массу и вовсе не выносится из него. И здесь мы обнаруживаем четко очерченную границу между светлой и окрашенной частями потока. Теперь отсечем на рис. 3а область выше плоскости порогов, а на рис. 3б область ниже нее и соответственно объединим

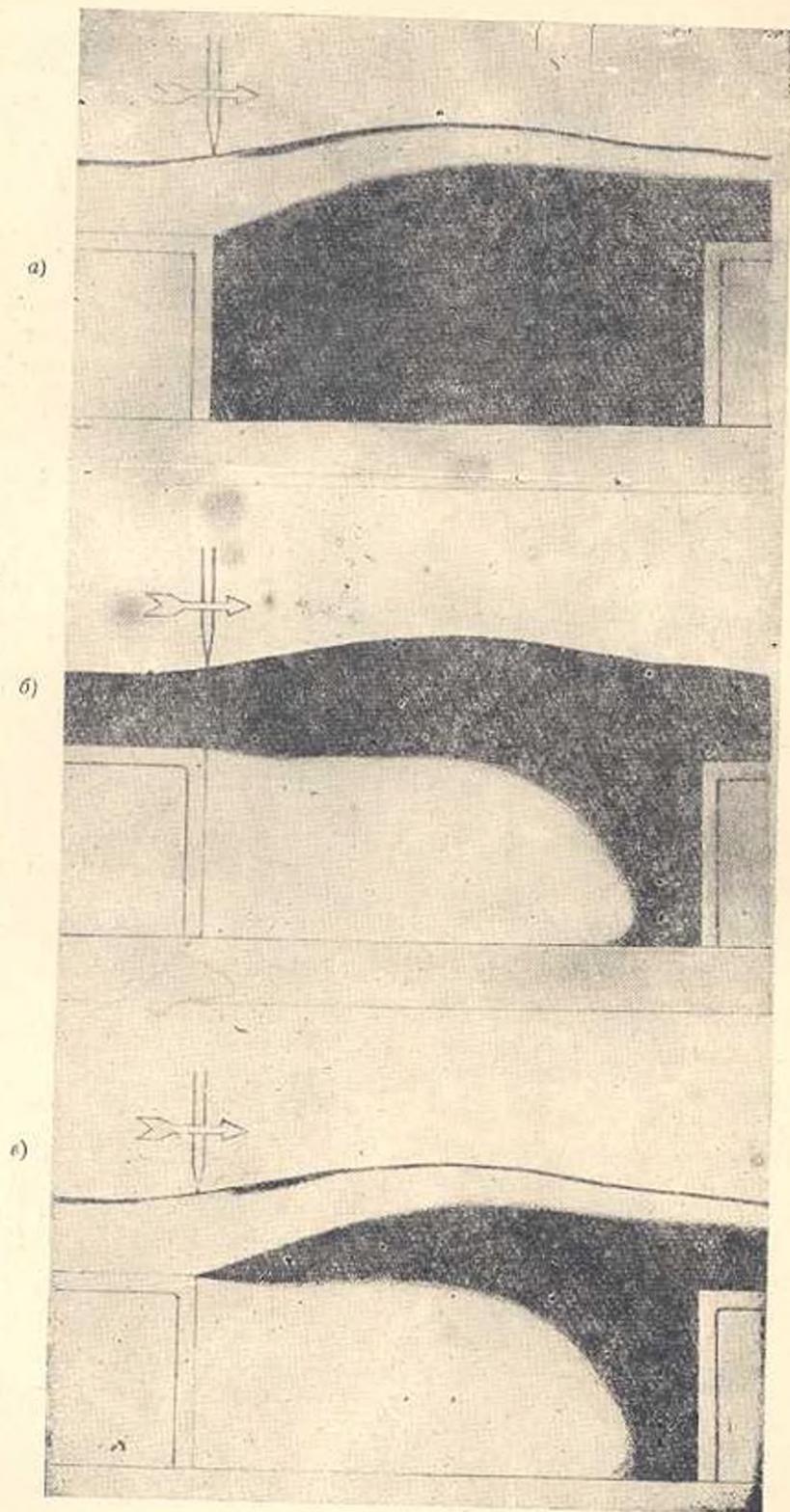


Рис. 3. Визуализация пограничного слоя.

их. Это сделано на рис. 3в. Комбинированный фотоснимок на рис. 3в раскрывает перед нами зону, в которой происходит турбулентный обмен между транзитным потоком и циркулирующей массой. Эта зона, зарождаясь на кромке уступа, с которой поток сходит, возрастает по направлению движения. Внутри этой зоны располагается *поверхность раздела*—граница между транзитным потоком и циркулирующей массой. Выявленная фигурой 3в зона имеет четкие границы. Границу, расположенную в транзитном потоке, назовем внутренней, а границу, расположенную в циркулирующей массе—внешней. Дальше этих границ ощутимого обмена не происходит, ибо если бы это происходило, то была бы расширена зона окрашивания. Итак, нам стала известна зона, в которой происходит обмен массами между транзитным потоком и циркулирующей массой. Однако не что иное, как массы являются носителями энергии, а если это так, то с обнаружением зоны обмена стала известной также и зона передачи энергии от транзитного потока циркулирующей массе. Эти зоны совпадают.

В дальнейших визуальных наблюдениях, посредством введения ниток, а также чисто механически было обнаружено наличие макропульсации во всем пространстве, ограниченном внутренней и внешней границами зоны обмена. Вне этого пространства пульсация была не ощутима. Было установлено также (посредством полкрашивания при малых скоростях движения), что все пространство зоны обмена пронизано крупномасштабными вихрями, ориентированными поперек потока. Эти вихри являются, по видимому, результатом свертывания поверхности раздела.

В дальнейшем, посредством подкрашивания и фотографирования, были исследованы граничные поверхности зоны обмена. Такое исследование, проведенное во всех опытах, представленных в табл. 1, обнаружило следующие свойства, касающиеся геометрии зоны обмена:

1. При прямолинейности (или практической прямолинейности) свободной поверхности внутренняя и внешняя граничные поверхности также прямолинейны, а углы α_1 и α_2 , характеризующие их положение относительно осевой плоскости 0—0 (рис. 4), практически равны $\alpha_1 \approx 5^\circ$, $\alpha_2 \approx 10^\circ$.

2. При возникновении волны над углублением как верхняя, так и нижняя граничные поверхности деформируются согласно деформациям свободной поверхности (рис. 3в), однако в прямолинейной развертке они приводят к плоскостям, расположенным под теми же углами $\alpha_1 \approx 5^\circ$ и $\alpha_2 \approx 10^\circ$ к развертке осевой поверхности 0—0, которая, деформируясь соответственно свободной поверхности, остается параллельной ей.

Обнаружение последних двух свойств сыграло большую роль при разработке методики проведения дальнейших опытов и оказало незаменимую услугу при обработке результатов опытов. Визуальные наблюдения могли в некоторой степени осветить и другой вопрос, а именно расположение и форму поверхности раздела, являющейся гра-

ницей между транзитным потоком и циркулирующей массой. Заранее было известно положение лишь одной точки поверхности раздела — начальной точки „А“ (рис. 4). В этой точке, совпадающей с кромкой уступа, два потока — циркулирующий и транзитный — сходятся. Визуализация могла дать представление о положении еще одной точки, принадлежащей поверхности раздела — конечной ее точки „Б“. В этой точке два потока расходятся. Опыты по определению места точки „Б“ были проведены для случая, когда движение не сопровождается возникновением волны над углублением. Эти опыты дали следующие сведения о поверхности раздела:

1. Во всех случаях точка „Б“ лежит ниже плоскости 0—0, что

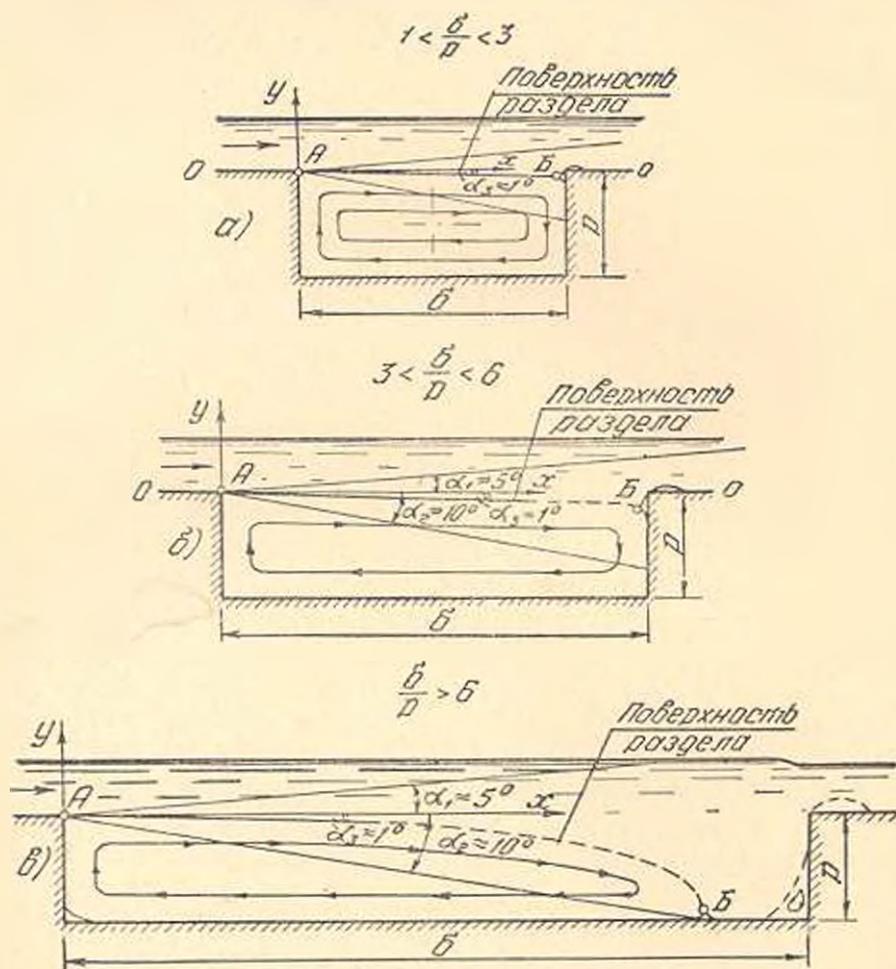


Рис. 4. Возможные формы поверхности раздела.

свидетельствует о расширении транзитного потока по направлению движения.

2. Во всех случаях точка „Б“ находится в пределах зоны, очерченной лучами α_1 и α_2 . Это обстоятельство вместе с учетом положе-

няя точки „А“ означает, что и поверхность раздела всегда располагается внутри этой зоны.

3. При соотношения $1 < \frac{\lambda}{\rho} < 6$ движение носит характер, изображенный на фиг. 4а, б. В этом случае точка „Б“ располагается выше дна углубления, в окрестности его низовой грани.

4. При $1 < \frac{\delta}{\rho} < 3$ расширение транзитного потока незначительно и, если считать поверхность раздела плоской (что в этом случае весьма вероятно), то она составляет с плоскостью 0—0 угол $\alpha_3 \sim 1^\circ$ (фиг. 4а).

5. При значениях $\frac{\lambda}{\rho} > 3$ поверхность раздела повидимому уже становится криволинейной, расширение транзитного потока происходит более интенсивно, чем при $1 < \frac{\lambda}{\rho} < 3$, а эта интенсивность в свою очередь возможно растет вместе с возрастанием $\frac{\lambda}{\rho}$ (фиг. 4б).

6. При соотношении $\frac{\lambda}{\rho} > 6$ транзитный поток расширяется на всю величину углубления, движение принимает характер, показанный на фиг. 4в и фактически превращается в случай движения за уступом, осложненный внезапным сжатием. В этом случае точка „Б“ располагается в окрестности дна углубления.

Заканчивая на этом изложение свойств, обнаруженных визуально, заметим, что особый интерес представляют свойства зоны обмена и поверхности раздела.

Данные опытов говорят о том, что зона обмена является особой зоной, возникающей на контакте транзитного потока и циркулирующей массы, вдоль поверхности раздела. Ее свойства отличны от свойств остальной части потока, что дает основание думать о своеобразности турбулентных процессов, происходящих в этой зоне.

Свойства зоны обмена обладают еще той интересной особенностью, что они очень сходны со свойствами пограничного слоя, который возникает при движении свободных турбулентных струй. Более того, имеют место даже количественные совпадения. Так, например, обращаясь к хорошо разработанной теории пограничного слоя бесконечного плоскопараллельного потока (5—8), мы обнаруживаем совпадение значений таких характеристик пограничного слоя и рассматриваемой нами зоны обмена, как углы α_1 , α_2 , α_3 .

Таким образом, исследуемая нами зона обмена является аналогом пограничного слоя и, следовательно, может носить такое же название. В последующем мы так и будем называть ее, помня однако что речь идет в данном случае о пограничном слое руслового потока.

ся в замкнутости циркуляции и стабильности его расхода, так как эти площади практически равны.

Так, например, для опыта № 1

$S_{\text{верх.}} = 3,19 \text{ дм}^2/\text{сек}$, $S_{\text{ниж.}} = 3,09 \text{ дм}^2/\text{сек}$, что означает практическое равенство, так как отклонения каждой из этих величин от их среднего значения $S_{\text{ср.}} = 3,14 \text{ дм}^2/\text{сек}$ составляет всего $\approx 1,59\%$. Таким образом, для условий опыта № 1, удельный циркуляционный расход оказался равным

$$q_0 = 3.14 \text{ м}^2/\text{сек}.$$

Если теперь перейти к полному циркуляционному расходу, то будем иметь

$$Q_0 = 3.14 \cdot 2.45 = 7.7 \text{ л/сек},$$

т. е. величину, соизмеримую с транзитным расходом

$$Q = 9.46 \text{ л/сек}.$$

Дальнейшие опыты, подтвердив такую же стабильность осредненных характеристик движения циркулирующей массы, показали также, что циркуляционный расход может быть и значительно большим, чем транзитный.

Обратимся снова к эпюре скоростей по осевой вертикали (рис. 5). В окрестности поверхности раздела привлекает внимание зона с большими градиентами скоростей (на рис. 5 она заштрихована). Нанесенные на эпюру границы пограничного слоя показывают, что эта зона представляет собою не что иное, как пограничный слой. При проведении оси пограничного слоя учтено его второе геометрическое свойство. Как и следовало ожидать, поверхность раздела оказалась ниже оси пограничного слоя, что произошло вследствие расширения транзитного потока. Угол расширения по данным графической обработки опыта № 1 оказался равным $\alpha_2 = 1^\circ 10'$. Угол α_2 был, описанным выше путем, вычислен и для ряда других опытов, представленных в таблице 1 и оказался также практически равным $\alpha_2 \approx 1^\circ$. Вертикали, по эпюрам которых определялись величины этого угла находились на различных относительных расстояниях $\frac{x}{\rho}$, где x — расстояние от точки зарождения пограничного слоя, взятое вдоль его оси. Величины относительных расстояний $\frac{x}{\rho}$ назначались независимо от относительной длины углубления $\frac{\delta}{\rho}$ и находились в интервале $0 < \frac{x}{\rho} < 3$. Последнее обстоятельство подтверждает сделанный на основании визуального наблюдения вывод о том, что при $\frac{\delta}{\rho} < 3$ поверхность раздела представляет прямую, наклоненную под углом $\alpha_2 \approx 1^\circ$ к оси пограничного слоя. С другой стороны, оно показывает, что положение и форма поверхности раздела при прямолинейности свободной поверхности зависят не

от относительной длины углубления $\frac{\delta}{p}$, а от относительного расстояния $\frac{x}{p}$.

Среди опытов, по данным которых сделан первый вывод, некоторые, например, разобранный выше опыт № 1, сопровождалась возникшей над углублением волной. В этом случае сделанные выше выводы будут касаться прямолинейной развертки поверхности раздела и оси пограничного слоя.

Положение поверхности раздела на относительных расстояниях нами не исследовано, так как возрастающая на этих расстояниях кривизна линий токов делала недопустимым пользование для этой цели эпюры U_x .

Перейдем к результатам кинематического исследования пограничного слоя, представляющим наибольший интерес. Изложение обнаруженных свойств лучше всего сделать на примере двух опытов— № 9 и № 10 (табл. 1). Эти опыты отличаются крайним различием условий.

Условия опыта № 9:

$$p = 20.54 \text{ см}; \quad \delta = 30.0 \text{ см}; \quad \frac{\delta}{p} = 1.46$$

$$Q = 20.1 \text{ л/сек}; \quad V_1 = 182 \text{ см/сек}; \quad h_1 = 4.5 \text{ см.}$$

$$R_{\tau_1} = 51700; \quad F_{\tau_1} = 7.52;$$

Транзитный поток вытекает из под щита. Движение сопровождается возникновением волны. Скорости измерялись на вертикалях:

$$x = 5 \text{ см}; \quad x = 10 \text{ см}; \quad x = 15 \text{ см}; \quad x = 20 \text{ см.}$$

Условия опыта № 10:

$$p = 20.54 \text{ см}; \quad \delta = 102.25 \text{ см}; \quad \frac{\delta}{p} = 5.0$$

$$Q = 11.2 \text{ л/сек}; \quad V_1 = 33 \text{ см/сек}; \quad h_1 = 13.88 \text{ см.}$$

$$R_{\tau_1} = 17.450; \quad F_{\tau_1} = 0.08;$$

Щит отсутствует; свободная поверхность практически прямолинейна и горизонтальна. Скорости измерялись на вертикалях:

$$x = 30 \text{ см}; \quad x = 45 \text{ см}; \quad x = 51,2 \text{ см.}$$

На рис. 6 в нескаженом масштабе показан пограничный слой и вертикали, на которых измерялись скорости U_x и эпюры скоростей U_x в условиях опыта № 9. Как было указано выше, этот опыт сопровождался возникновением волны и поэтому пограничный слой, изображенный на фиг. 6, представляет прямолинейную развертку действительного пограничного слоя.

Эпюры скоростей U_x свидетельствуют о непрерывной деформации скоростного профиля пограничного слоя. Отдаление от начала

пограничного слоя приводит к вытягиванию энур по высоте, соответственно, возрастающей толщине пограничного слоя, что в свою очередь приводит к уменьшению градиентов скоростей. Бросается в глаза исключительная закономерность кривых, характеризующих распре-

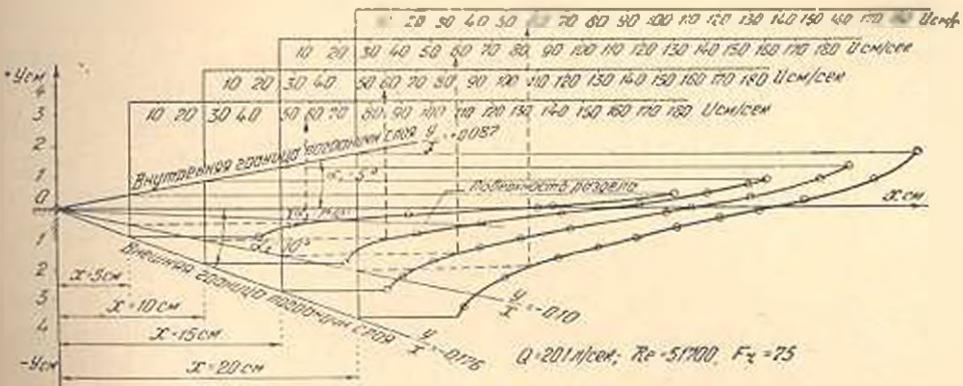


Рис. 6. Энурпы скоростей в пограничном слое.

деление скоростей U_x по толщине пограничного слоя. Однако главным в рассматриваемом графике является то, что он обнаруживает одно из интереснейших свойств пограничного слоя: *любой луч, проведенный из полюса 0 (точка зарождения пограничного слоя) является местом равных скоростей U_x .*

Это свойство на рис. 6 продемонстрировано для произвольного луча с относительной координатой $\frac{y}{x} = -0.10$. Горизонтальные пунктирные линии соответствуют скоростям U_x в тех точках 4-х различных сечений пограничного слоя, которые лежат на выбранном нами луче. Вертикальные пунктирные стрелки показывают на соответствующих шкалах величины скоростей U_x в этих точках. Как видно, все эти точки обладают практически одинаковыми скоростями

$$U_x = 58.5 \text{ см/сек}; 59.5 \text{ см/сек}; 58.5 \text{ см/сек}; 57.5 \text{ см/сек}.$$

Незначительные расхождения между этими значениями естественны, если учесть погрешности измерений и графических построений.

Рассматривая вышеприведенные значения скоростей, как значения одной и той же величины, полученные четырехкратным измерением и вычислив среднеарифметическую $U_x^{\text{II}} = 58.5 \text{ см/сек}$, мы увидим, что максимальное отклонение частных значений от среднего значения составляет всего $\pm 1.7\%$, т. е. величину, не превышающую неизбежные погрешности гидравлических измерений подобного рода. Таким образом опытные данные подтверждают, что произвольно выбранный луч $\frac{y}{x} = -0.10$ действительно характеризуется условием

$U_x = \text{const}$. То же самое можно иллюстрировать на любом другом луче. Так, например, все точки, расположенные на оси пограничного слоя,

г. е. имеющие относительную координату $\frac{y}{x} = 0$, обладают скоростью $U_x = 137.0$ см/сек. и точки, расположенные на луче, совпадающем с внутренней границей пограничного слоя, т. е. имеющие относительную координату $\frac{y}{x} = +0.087$, обладают скоростью $U_x = 185$ см/сек.

Из сказанного выше следует, что любая точка внутри пограничного слоя и на граничных ее поверхностях с кинематической точки зрения характеризуется ее относительной координатой $\frac{y}{x}$.

Непосредственным следствием рассмотренного выше свойства является подобие эюр скорости пограничного слоя. Это свойство очень важное как с теоретической, так и с практической точек зрения. Оно заключается в том, что если бы мы построили эюры скоростей в различных сечениях пограничного слоя в координатах U_x и $\frac{y}{x}$, то мы получили бы одну и ту же универсальную для всех сечений пограничного слоя эюру. Универсальную для всех сечений эюру скоростей мы получили бы и в том случае, если бы построили ее в координатах $\frac{U_x}{const}$, $\frac{y}{x}$, причем для общности и для учета одного из определяющих факторов движения удобно за постоянную брать значение средней скорости движения v_1 в сечении 1—1, т. е. в сечении, где зарождается пограничный слой. В таком случае мы будем иметь дело с универсальной безразмерной эюрой.

На рис. 7 приведена такая эюра, построенная по данным че-

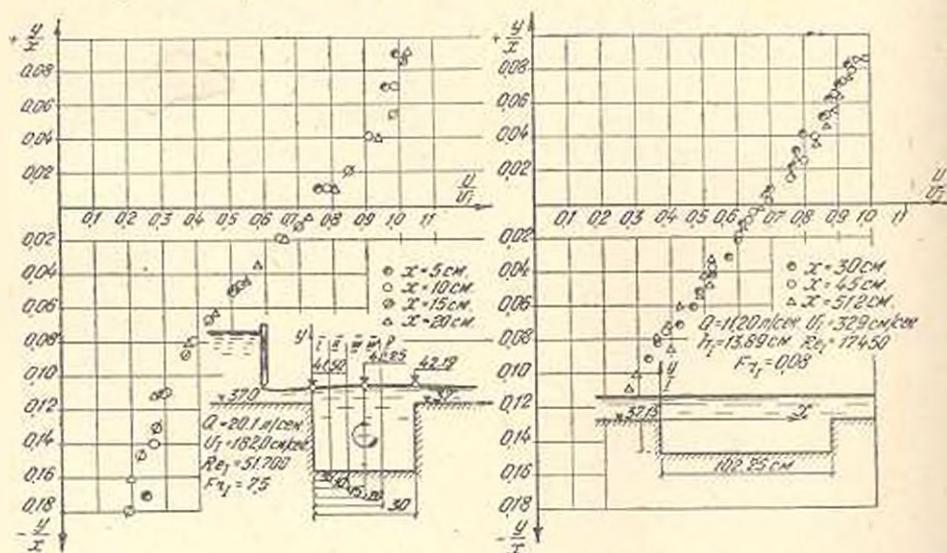


Рис. 7. Безразмерные эюры скоростей в пограничном слое.

тырех опытных эпюр пограничного слоя, рассмотренных выше на фиг. 6 Фиг. 7а является наглядным доказательством универсальности безразмерной эпюры скоростей пограничного слоя и в свою очередь повторно подтверждает его первое кинематическое свойство. Для доказательства тех же свойств пограничного слоя, на основе данных опыта № 10, достаточно ограничиться приведенной на рис. 7б универсальной безразмерной эпюрой скоростей пограничного слоя.

Описанные выше кинематические, также как и геометрические свойства пограничного слоя, нашли свое подтверждение во всех опытах по схеме 1а, что говорит об общности свойств пограничного слоя, возникающего при движении по схеме 1а. С другой стороны, сравнение условий опыта № 10 с условиями других опытов говорит о том, что *эти свойства сохраняются в самых широких пределах и что с этой точки зрения нет разницы между спокойными и бурными потоками.*

То обстоятельство, что при проведении опытов по схемам 1б и 1в, сразу же стали обнаруживаться те же свойства движения, что и описанные выше, позволило ограничить количество опытов. Условия, при которых проводились эти опыты, ясны из вышеприведенной таблицы 1. Методы визуального и кинематического исследования здесь оставались теми же, что и выше.

Перейдем к результатам опытов со схемой 1б (опыты №№ 16, 17, 18). Визуальные наблюдения с введением механических примесей и подкрашиванием привели к тем же выводам о характере движения на участке отрыва, что и прежде. Геометрические свойства пограничного слоя те же, с той лишь разницей, что в данном случае ось пограничного слоя остается параллельной не свободной поверхности, а дну русла, а так как последнее обычно прямолинейно, то и ось и граничные поверхности пограничного слоя обычно прямолинейны. Углы α_1 и α_2 сохраняют свои значения. Все выводы относительно положения поверхности раздела, величины угла α_3 и двух возможных видов движения остаются в силе и здесь, однако формулировки изменяются с учетом того обстоятельства, что в данном случае циркулирующая масса является поверхностной и потому пограничный слой обращен своей внешней границей кверху, поверхность раздела обращена выпуклостью вниз и точка Б всегда лежит выше плоскости 0—0 (см. фиг. 1б и 4). Отношение $\frac{z}{R}$ в данном случае должно быть заменено отношением $\frac{z}{h_m}$, где h_m — глубина воды в шахте, т. е. высота циркулирующей массы.

Что касается кинематической структуры, то эпюры скоростей по осевой вертикали шахты показали, что с этой точки зрения данная схема является аналогом рассмотренной выше схемы 1а (рис. 6), обращенным кверху циркулирующей частью.

Обработка эпюр трех опытов, как и прежде, показала стабильность циркуляционного расхода и привела к тем же представлениям о его возможной величине. Свойства поверхности раздела, обнаруженные перед этим визуально, также подтвердились. Наконец, обработка эпюр пограничного слоя привела к тем же двум его кинематическим свойствам.

Проведение опытов по схеме Iв было осложнено сильным волнением и неустойчивостью движения за уступом при числах $F_r > 1$, однако, несмотря на это, один из трех опытов этой серии (опыт № 20) для общности, был проведен при $F_r > 1$. При движении по схеме Iв расположение циркулирующей массы аналогично случаю, приведенному на фиг. 4в. Визуальные наблюдения с введением механических примесей и подкрашиванием привели и в этом случае к тем же выводам в общем характере движения, что и в прежних двух схемах. Геометрические свойства пограничного слоя остаются теми же, что и при схеме движения Iа. Практические значения углов α_1 и α_2 остаются прежними. Поверхность раздела располагается внутри пограничного слоя, а примерная его форма соответствует рис. 4в.

Результаты кинематического исследования пограничного слоя удобнее всего иллюстрировать на материалах опытов №№ 19 и 20 (табл. I). Оба опыта сопровождалась значительной деформацией свободной поверхности за уступом и отличались друг от друга тем, что в одном случае (опыт 19) $F_r < 1$, а в другом (опыт № 20) $F_r > 1$.

На рис. 8 приведены совмещенные эпюры скоростей U_x в пограничном слое, измеренные на расстояниях $x = 30$ см и $x = 86$ см от уступа высотой $h = 10$ см (опыт № 18). Эти эпюры, характеризующие распределение скоростей в пограничном слое, в сечениях, отстоящих на больших расстояниях друг от друга и от уступа, резко отличаются вследствие непрерывной деформации скоростного поля пограничного слоя в направлении движения.

На рис. 9 те же эпюры представлены в безразмерном виде и свидетельствуют о тех же кинематических свойствах пограничного слоя, которые были обнаружены при изучении двух других схем движения. И в данном случае мы имеем дело с единой для всех сечений пограничного слоя универсальной безразмерной скоростью.

Как было указано выше, опыт № 20, в отличие от опыта № 19, проводился при $F_r > 1$, однако кинематические свойства пограничного слоя остались теми же, что и в опытах № 19 и № 21, проведенных при $F_r < 1$. Таким образом и на примере движения за уступом убеждаемся в том, что свойства пограничного слоя едины и что с точки зрения этих свойств нет разницы между бурными и спокойными потоками.

Мы изложили результаты опытного исследования трех, встречающихся в гидротехнической практике, случаев движения плоского руслового потока. Все эти движения характеризовались тем, что сопровождалась отрывом потока от стенок русла.

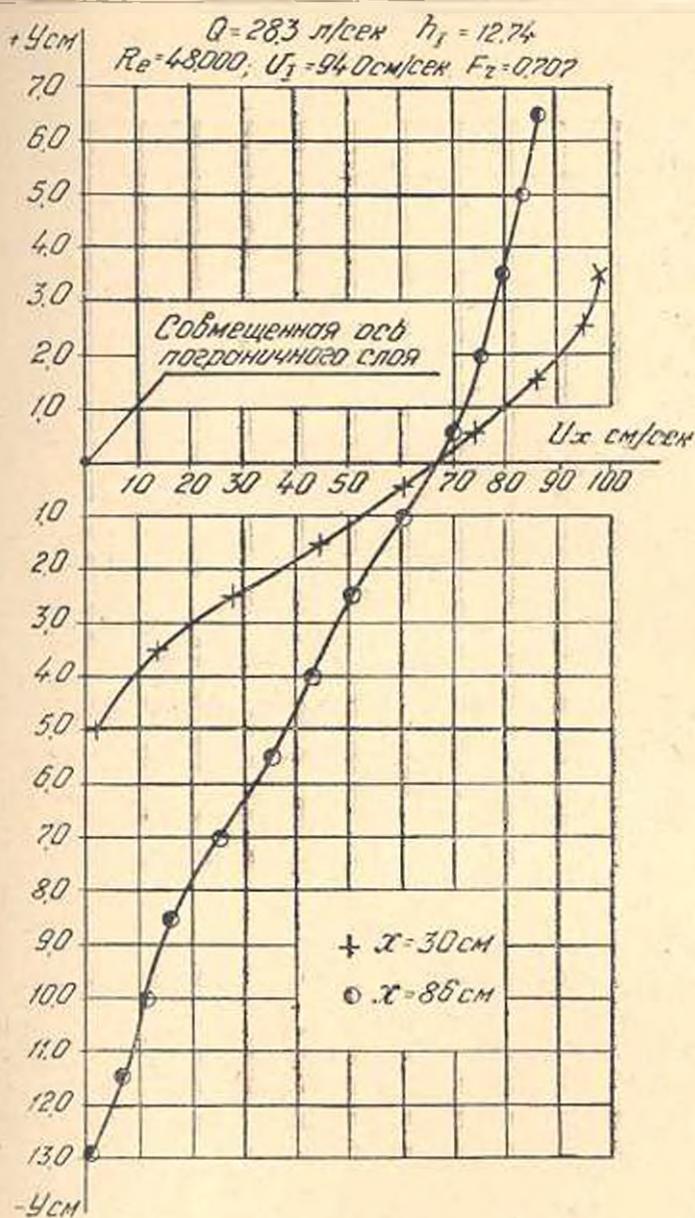


Рис. 8. Совмещенные эпюры скоростей в пограничном слое.

Исследования позволили получить не только общее представление о характере движения на участках отрыва, но и позволили выявить пограничный слой с его специфическими свойствами.

Упомянутые общие представления, хотя и получены при наблюдении за плоским движением, с полным основанием могут быть распространены и на случай отрыва потока в пространственных условиях. Эти представления могут быть резюмированы следующим образом:

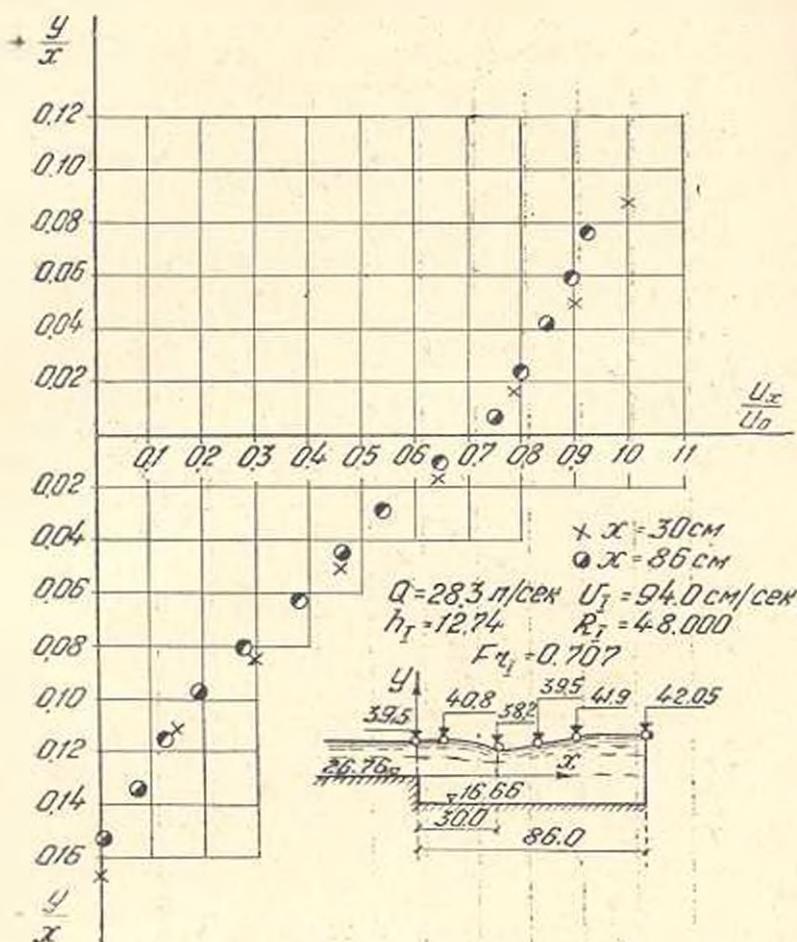


Рис. 9. Безразмерные профили скоростей в пограничном слое.

1. При отрыве потока от стенок русла, освобожденные от потока пространства заполняются нетранзитными массами жидкости, которые под воздействием и за счет энергии транзитного потока приходят в замкнутое: циркуляционное движение.

2. Между нетранзитной циркулирующей массой и транзитным потоком возникает поверхность раздела. Поверхность раздела зарождается в точке отрыва и завершается либо на стенке или дне русла, либо на свободной поверхности. По этой причине движение на участке отрыва можно назвать движением с возникновением поверхности раздела, что объединяет, рассматриваемые в данной работе движения, с движениями, в которых также возникает поверхность раздела, но не по причине отрыва потока от стенок.

3. Вместе с возникновением поверхности раздела и в том же месте возникает пограничный слой — зона, свойства которой коренным образом отличаются от свойств остальной части потока. Пограничный слой, благодаря турбулентному перемешиванию, расширяется

по направлению движения и сохраняет свои специфические свойства до сечения, в котором завершается поверхность раздела, либо до сечения, в котором выклинивается на свободную поверхность или твердую стенку внутренняя граница пограничного слоя, в зависимости от того, что раньше произойдет. За этими сечениями происходит вырождение и исчезновение пограничного слоя. *Обмен в пограничном слое носит макротурбулентный характер*, что является одним из отличий пограничного слоя от остальной части турбулентного потока.

4. Взаимодействие* между транзитным потоком и нетранзитной циркулирующей массой осуществляется посредством интенсивного макротурбулентного обмена, который происходит внутри пограничного слоя, по всей его толщине и на всем его протяжении. Интенсивность и масштаб этого обмена зависят от интенсивности и масштаба пульсации в пограничном слое, а последние в свою очередь зависят от характеристик движения и от условий, способствующих общей неустойчивости движения.

5. Нет ничего общего между расходом циркулирующей массы и расходом турбулентного обмена. В одних случаях первый может быть в сотни раз больше второго, в других они могут быть соизмеримыми величинами.

6. Рассеяние энергии транзитного потока на участке отрыва, т. е. на участке возникновения поверхности раздела, можно рассматривать как работу, затраченную потоком на преодоление турбулентных касательных напряжений, возникающих на поверхности раздела. Эти напряжения должны быть значительными ввиду очень крупной и интенсивной пульсации и больших градиентов скоростей в пограничном слое.

7. С точки зрения шести предыдущих выводов не существует разницы между спокойным и бурным турбулентным потоками, равно как и между турбулентными потоками с различными числами Рейнольдса.

Другие свойства движения на участке плоского отрыва и в частности основные свойства пограничного слоя не могут быть обобщены и на случай пространственного отрыва без специального экспериментального обоснования. Эти свойства и вытекающие из них следствия могут быть окончательно сформулированы следующим образом:

1. Пограничному слою свойственно динамическое подобие всех его сечений. Эпюры скоростей U_x во всех сечениях пограничного слоя подобны и могут быть представлены одной универсальной эпюрой

$$U_x = f\left(\frac{y}{x}\right).$$

2. Пограничный слой, а следовательно и ось ее и граничные поверхности ориентируются соответственно внешней границе** транзит-

* Передача масс, энергии, температуры, примесей.

** Внешней границей может быть стенка, либо свободная поверхность. Внутренней границей транзитного потока называем поверхность раздела.

ного потока, причем ось пограничного слоя всегда параллельна последней. При прямолинейности внешней границы транзитного потока, прямолинейны также и ось и граничные поверхности пограничного слоя, причем последние образуют с осью углы α_1 и α_2 . При криволинейности внешней границы, криволинейны также ось и граничные поверхности пограничного слоя, однако в развертке последние образуют с осью те же углы α_1 и α_2 .

3. Лучи, проведенные в пограничном слое из точки его зарождения, являются линиями равных скоростей.

$$U_x = \text{const.} \quad (2)$$

4. Они же являются и линиями равных касательных напряжений

$$\tau = \text{const.} \quad (3)$$

Экспериментальные доказательства первых трех свойств пограничного слоя были изложены выше. Что же касается четвертого свойства, то оно, как и третье свойство пограничного слоя является прямым следствием первого его свойства, говорящего о динамическом подобии сечений пограничного слоя.

Действительно, динамическое подобие означает равенство критериев Эйлера для сходственных точек

$$\frac{\rho_1}{\rho U_1^2} = \frac{\rho_2}{\rho U_2^2} = \text{idem.} \quad (4)$$

Для пограничного слоя сходственными точками будут точки, лежащие на одном и том же луче. Однако на основании условия (2), на данном луче $U_1 = U_2 = \text{const.}$, что при наличии условия (4), приводит к выводу о постоянстве касательных напряжений во всех точках пограничного слоя, лежащих на данном луче

$$\tau_1 = \tau_2 = \text{const.} \quad (5)$$

Как то было отмечено при изложении экспериментального материала, свойства 1, 3, а в данном случае и 4, в случае криволинейности пограничного слоя касаются его прямолинейной развертки.

Выше при изложении экспериментальных данных, касающихся второго свойства пограничного слоя, мы приводили также опытные значения углов α_1 и α_2 : $\alpha_1 \approx 5^\circ$ и $\alpha_2 \approx 10^\circ$.

По поводу этих значений нужно отметить, что они, характеризующая турбулентное расширение пограничного слоя, не могут не зависеть от характеристик турбулентности и в частности от такой ее характеристики, как длина пути перемешивания. Последняя в случае квазиустановившегося движения может считаться функцией только координат.

$$l = f(x, y, z) \quad (6)$$

Вполне обоснованно можно полагать, что вид этой функции, для пограничного слоя, одинаков во всех рассмотренных нами случаях. Однако экспериментальная константа или константы, входящие в нее,

будут зависеть, как показывает опыт аэродинамических исследований, от начальных условий: начальной турбулизации, начальной неравномерности распределения скоростей и т. д.*. Следовательно и величина длины пути перемешивания и величины углов α_1 и α_2 , равно как и α_3 , будут зависеть от начальных условий. На основании сказанного можно заключить, что величины углов α_1 , α_2 , α_3 могут быть наперед заданы лишь только для наперед заданных начальных условий. То обстоятельство, что при различных схемах движения и в различных опытах мы наблюдали практическое постоянство углов α_1 , α_2 , α_3 , говорит о том, что начальные условия наших опытов мало чем отличались друг от друга. С другой стороны, близость опытных схем к натурным и идентичность начальных условий — лабораторных и натуральных, позволяют считать, что для обычных плоских гидротехнических потоков значения углов α_1 , α_2 , α_3 колеблются в небольших пределах и что их осредненные опытные значения $\alpha_1 \approx 5^\circ$, $\alpha_2 \approx 10^\circ$ и $\alpha_3 \approx 1^\circ$ с достаточной для практики точностью могут заменить их конкретные значения.

Между русловыми потоками, ограниченными твердыми стенками, имеющими свободную поверхность, и между свободными турбулентными потоками и струями, вытекающими в безграничное (или практически безграничное) пространство, заполненное той же жидкостью, существует коренная разница. Соответственно и пограничные слои русловых потоков и свободных струй оказываются в крайне отличающихся условиях. Если для первых характерна близость твердых стенок, то для вторых, наоборот, их отсутствие или отдаленность. В случае свободных струй на внешней границе пограничного слоя осуществляется лишь поступление, присоединение масс извне, а продольная составляющая скорости $U_x = 0$. В случае русловых потоков поступление масс извне осуществляется лишь на части внешней границы пограничного слоя, а на другой (ниже по течению) имеет место отдача тех же масс, что приводит к циркуляции нетранзитной массы. Равенство нулю, на внешней границе, осевой составляющей U_x в одних случаях наблюдается (рис. 8), а в других нет (см. рис. 5, 6, 7).

Поверхность раздела в свободных потоках прямолинейна и распространяется безгранично по направлению движения. В русловых же потоках поверхность раздела криволинейна и завершается весьма быстро либо на твердой, либо на свободной поверхности. Однако, несмотря на перечисленные коренные различия, мы обнаруживаем поразительное совпадение основных свойств пограничного слоя плоского руслового потока со свойствами пограничного слоя свободных турбулентных потоков. Чтобы убедиться в этом, достаточно обратиться к одному из источников (5—8). Сравнение делает совершенно очевидным совпадение всех четырех основных свойств пограничного слоя. Больше того, как было отмечено выше, мы обнаруживаем и количественные

* Начальным сечением в данном случае нужно считать сечение, в котором зарождается пограничный слой.

совпадения. Так, например, оказываются одинаковыми числовые значения углов α_1 , α_2 , α_3 для пограничных слоев руслового потока и бесконечного плоскопараллельного свободного потока.

Указанные выше четыре свойства, а именно: закон турбулентного расширения пограничного слоя, закон подобия эпюр скоростей, свойства лучей, проведенных в пограничном слое из его начала, являются отличительными свойствами пограничного слоя свободных турбулентных потоков.

Нет сомнения, что эти свойства обуславливаются свойственными свободной турбулентности законами турбулентного перемешивания. А это означает, что совпадение основных свойств пограничного слоя свободных потоков и пограничного слоя русловых потоков равносильно совпадению и таких органических особенностей, как свойственные им законы турбулентного перемешивания. После сказанного можно считать вполне обоснованным следующий принципиальный вывод: *пограничный слой русловых потоков является зоной свободной турбулентности.*

Законы перемешивания при свободной турбулентности наиболее просты и сводятся (5—8) к хорошо оправдавшейся гипотезе Л. Прандтля о постоянстве длины пути перемешивания в поперечном сечении пограничного слоя, т. е. ее независимости от координат y и z , и к наличию линейной связи

$$l = \text{const} \cdot x; \quad l = c \cdot x \quad (7)$$

где l — длина пути перемешивания по Л. Прандтлю,

x — расстояние от точки зарождения пограничного слоя, взятое вдоль направления движения,

c — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом турбулентного перемешивания.

При принятии гипотезы Л. Прандтля соотношение (7) вытекает логически из первого и второго свойств пограничного слоя (см. напр. [6]). Таким образом, в свободном турбулентном пограничном слое длина пути перемешивания является линейной функцией расстояния „ x “ от начала пограничного слоя.

Выдвигая свою гипотезу, Л. Прандтль исходил из того факта, что у свободного потока отсутствуют твердые границы, гасящие колебательные движения частиц. Тем самым, отсутствие у потока твердых границ было поставлено, как необходимое условие, без которого не может возникнуть свободная турбулентность. Это условие принималось всеми дальнейшими исследователями, и в настоящее время является общепризнанным (6—8). Однако, приведенные выше факты позволяют оспаривать это общепринятое положение. То обстоятельство, что свободная турбулентность обнаружена в пограничном слое русловых потоков — в непосредственной близости от стенок говорит о том, что в действительности не отсутствие у потока твердых границ, а какое то иное условие обуславливает возникновение свободной турбулентности.

Это условие должно быть общим, одним и тем же, как для руслового так и для свободного потока.

Обращаясь к тем условиям, в которых возникает свободная турбулентность в том и в другом случае, мы находим среди этих различных условий лишь одно, являющееся общим как для руслового, так и для свободного потока. Этим *общим условием, сопровождающим возникновение свободной турбулентности, является наличие поверхности раздела*. Действительно, движение свободных струй всегда сопровождается возникновением поверхности раздела и здесь мы всегда имеем дело со свободной турбулентностью и ее своеобразными свойствами. В русловых потоках поверхность раздела возникает лишь в некоторых определенных случаях, но и свободная турбулентность возникает только в этих определенных случаях.

Теперь мы можем сформулировать принципиальный вывод вытекающий из данной работы: *свободная турбулентность является единым свойством потоков, возникающим в связи с возникновением поверхности раздела и исчезающим вместе с ее исчезновением. Это свойство не зависит от наличия или отсутствия твердых стенок, равно как и не зависит ни от размеров потока, ни от размеров пространства, в котором поток течет.*

Московский институт инженеров водного хозяйства
им. В. Р. Вильямса

Поступило 4 VI 1955

2. Խ. ԱՅՎԱԳՅԱՆ

ՏՈՒՐԲՈՒԼԵՆՏ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՋՐԱՏԱՐԻ ՊԱՏԵՐԻՅ ԱՆՋԱՏՎԵԼՈՒ ՏԵՂԱՄԱՍԵՐՈՒՄ

Ա. մ փ ա փ ու ս մ

Հոդվածում բերված են էքսպերիմենտալ հետազոտությունն արդյունքները Հոսանքի անջատումը ջրատարի պատերից հաճախ է տեղի ունենում ինչպես բնական պայմաններում, այնպես էլ հիդրատեխնիկական կառուցվածքներում:

Յույց է տրվում, որ հոսանքը ջրատարի պատերից անջատման մասնակի գոյացող հեղուկի ստորանդիտային մասաները կատարում են փակ ճիւղային շարժում: Այդ մասաների և հիմնական (տրանզիտային) հոսանքի միջև տեղի ունեցող համագործակցությունը լրիվ չափով պայմանավորված է տարբուրենա փոխանակությամբ:

Յիրիույթար մասաների և հիմնական հոսանքի միջև գոյություն ունի տրոհման մակերևույթ: Այդ մակերևույթի առաջ գալը հանդիսանում է հոսանքը ջրատարից անջատվելու ամենակարևոր հետևանքը. նրա առաջ գալու հետ միասին հոսանքում կատարվում են արմատական սրակական փոփոխություններ: Նույն կետում, որտեղ որ տրոհման մակերևույթը և ըստ նրա երկայնություն ծագում է սանձանային ճերտը, որը օժտված է առանձնակի հատկություններով, է կատարվում է հիմնական հոսանքի և ոչ

տրանզիտային մասանների միջև տեղի ունեցող տուրբուլենտ փոխանակութիւնը, վերջինս կրում է մակրոտուրբուլենտ բնույթ: Մակրոտուրբուլենտութիւնը հանդիսանում է սահմանային շերտը հոսանքի մյուս մասերից տարբերող հատկանիշներից մեկը: Սահմանային շերտի մյուս, փափուկ կարևոր հատկութիւններն են՝ տարբեր հատվածքների դինամիկ նմանութիւնը, լայնացման ուղղաձիգ օրենքը և ըստ ազատ մակերևութի գաոսափորվելու հատկութիւնը:

Համեմատելով ազատ տուրբուլենտութիւնի հատկութիւնները հայտնաբերված հատկութիւնների հետ, եզրակացվում է, որ տվյալ դեպքում նույնպես դարձ ունենք ազատ տուրբուլենտութիւնի նման: սակայն քանի որ ներկայումս բնութենված է համարել (5—8), որ վերջինս պայմանավորված է կոչւտ պատերի անսահման նոսր լինելով, ապա վերևում բերված եզրակացութիւնը վիճելի է դարձնում այդ բնութենված կարծիքը:

Համեմատելով այն պայմանները, որոնցում ծագում է ազատ տուրբուլենտութիւնը ազատ հոսանքների և ջրատարներում կատարվող հոսանքների դեպքում, եզրակացվում է, որ միակ բնութենուր պայմանը, որը և պատճառ է դառնում ազատ տուրբուլենտութիւնի ծագման՝ դա տրոհման մակերևութի առկայութիւնն է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости. Под ред. С. Гольдштейна, т. 1, М., ГИИЛ, 1948.
2. А. В. Грицук, Механизм и теория прыжка потока жидкости, 1932.
3. С. В. Избаш, Основы гидравлики, М., 1952.
4. К. А. Михайлов и др., Гидравлика, гидрология, гидрометрия, М., 1952.
5. W. Tollmien, Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge, ZAMM, Bd 6, Heft 6, 1926.
6. Г. Н. Абрамович, Турбулентные свободные струи жидкостей и газов, М., 1948.
7. Л. Ф. Лойцянский, Аэродинамика пограничного слоя, М., 1911.
8. Г. Шлихтинг, Теория пограничного слоя, М., ИИЛ, 1956.

Л. А. ЧИЛИНГАРЯН

К ВОПРОСУ РАЗБИВКИ ГОРНЫХ ВОДОТОКОВ НА СТУПЕНИ КАСКАДА ДЕРИВАЦИОННЫХ ГЭС

Для составления схемы энергетического использования водотока рассматривают варианты разбивки его на отдельные ступени, исходя при этом из гидрологических, топографических, геологических и прочих условий.

Оптимальный вариант разбивки падения реки на ступени устанавливается в результате энерго-экономического анализа, в котором энергетические расчеты являются необходимым звеном всего расчета. Поэтому для полной оценки энергетических возможностей реки в анализе вариантов должны быть рассмотрены и энергетически целесообразные схемы разбивки, при которых обеспечивается максимальный энергетический эффект (выработка энергии, мощность).

Методы составления таких схем даны в работах Сейфуллы Д. О. [3] и Семенова В. В. [4], которые в сущности одинаковы. Они предназначены для выбора напорной схемы каскада деривационных ГЭС, с учетом энергетического эффекта.

По методу Сейфуллы Д. О. по имеющейся напорной характеристике (кривой роста среднегодовых расходов реки Q_0 по мере роста ее падения H) (рис. 1а), строится мощностная характеристика $N = f(Q_0, H)$ с одновременной разбивкой реки на ступени каскада ГЭС (рис. 1б). С удалением водозабора деривации от конца рассматриваемого участка вверх по течению используемый напор будет возрастать, а расход уменьшаться. В соответствии с этим, мощность будет либо непрерывно возрастать, при относительно малом уменьшении захватываемого деривацией расхода, либо, возрастая достигнет максимума и затем снова начнет уменьшаться с увеличением напора H , за счет значительного уменьшения Q_0 . Точка, соответствующая максимуму N определит первую (снизу) ступень каскада. Таким же образом могут быть найдены следующие ступени каскада.

Для возможности учета вопросов водно-энергетического регулирования, Семенов В. В. предлагает разбивку вести сверху вниз, соблюдая на каждой ступени условие:

$$N_{\text{ср. и.}} - N_{\text{ср. нн.}} = \text{макс.}$$

где $N_{\text{ср. и.}}$ и $N_{\text{ср. нн.}}$ — соответственно средняя используемая и неисполь-

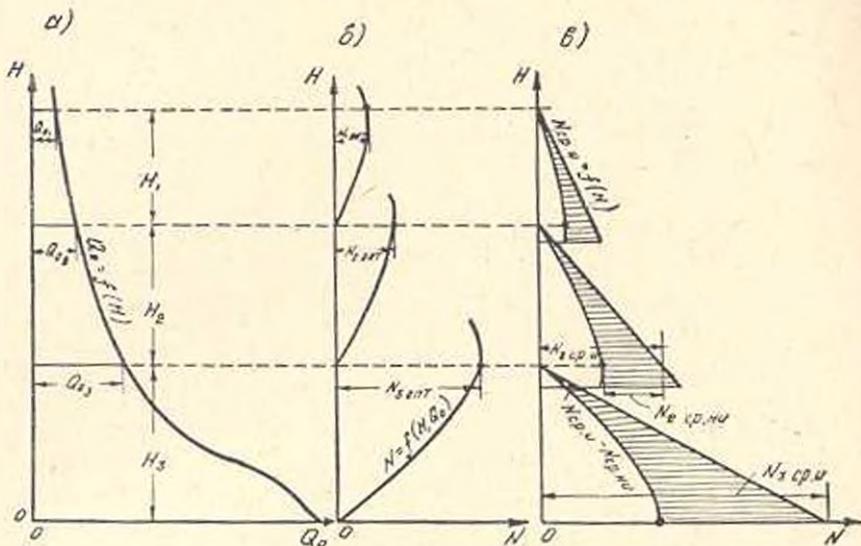


Рис. 1.

зубаемая мощности на участке дериивационной ступени — причем, под последней понимается мощность, соответствующая местной приточности между водозабором и силовым узлом ГЭС.

Необходимо отметить, что в случае, когда створ водозабора верхней установки в обоих методах взяты одинаковыми, то результаты разбивки водотока на ступени, при отсутствии регулирования, у Сейфуллы и Семенова совпадают, что и указано в [4].

При такой разбивке суммарная мощность всех установок на данном участке для получаемого числа ступеней не будет максимальной, так как напоры их оптимальны только при рассмотрении эффективности установок в отдельности. Между тем необходимо учесть общий энергетический эффект рассматриваемого каскада ГЭС в целом. Такая попытка сделана в настоящей работе.

В статье предлагается метод составления оптимальной, с энергетической точки зрения, схемы энергоиспользования малой горной реки между значительными ее притоками применительно к каскадам дериивационных незарегулированных ГЭС. Дается также способ дальнейшего энерго-экономического анализа для выбора оптимального варианта из числа энергетически целесообразных схем.

Энергетически оптимальной схемой считается схема с максимальным энергетическим эффектом, под которым понимается суммарная годовая выработка энергии (или среднегодовая мощность) каскада ГЭС в среднем по водности году.

Таким образом, поставленной основной задачей является определение соотношения напоров ступеней (напорную схему), соответствующего энергетически оптимальной схеме при определенном числе ступеней.

В работе принимается допущение, что обеспеченность расчетного расхода для любых створов участка реки известна, т. е., что задан расчетный расход для каждого створа. Принимается также, что к. п. д. ГЭС (η_r) каскада равны между собою и не зависят от напора.

Необходимым условием решения поставленной задачи и основой гидроэнергетического анализа, при составлении напорной схемы, принимается напорная характеристика реки. Последняя здесь представляет из себя кривую роста средних используемых расходов $Q_{с.н.}$ по мере падения H водотока $Q_{с.н.} = f(H)$, в отличие от кривой роста среднелетних расходов принятой в работах [3] и [4].

Определяя понятие напорной характеристики, заметим, что энергия, которую можно было получить за счет местной приточности на участке реки в пределах деривации той или иной ГЭС — не используется. Поэтому возникает вопрос о таком размещении заданного числа ступеней, которое позволило бы максимально уменьшить теряемую энергию местной приточности. Следует отметить, что указанное неполное использование энергии местной приточности имеет место только в случае деривационных ГЭС.

Если иметь кривую обеспеченности расходов $P(Q)$ для любых створов участка реки, то для этих створов $Q_{с.н.}$ можно подсчитывать по формуле:

$$Q_{с.н.} = \frac{1}{100} \int_0^{Q_p} P(Q) dQ \quad (1)$$

где Q_p — расчетный расход заданной обеспеченности.

Нарастание расхода $Q_{с.н.}$ на малых горных реках между ее значительными притоками происходит плавно или со сравнительно малыми скачками. Его можно выразить при помощи многочлена вида

$$Q = Q_n + \alpha_1 H + \alpha_2 H^2 + \dots + \alpha_n \cdot H^n, \quad (2)$$

или параболической кривой

$$Q = Q + \alpha H^2 \quad (3)$$

Здесь Q_n — средний используемый расход в начале рассматриваемого участка,

Q — то же, в точке с падением H , считая от начала (в дальнейшем индексе к $Q_{с.н.}$ опускается),

α и γ — постоянные коэффициенты.

Зависимостью (2) можно выразить действительную кривую напорной характеристики с большей точностью, чем по (3), однако последняя более удобна для математического анализа, а точность ее практически достаточна, что подтверждается нашими подсчетами, проведенными применительно к малым рекам АрмССР.

Например, для реки Гарпи (приток р. Памбак) на одном участке (ГЭС III—VII по данным [5, г. V]) напорную характеристику, при

шестимесячной обеспеченности расчетного расхода, можно с достаточной точностью выразить формулой (рис. 2а):

$$Q = 0,57 + 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot H^{1,75} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для р. Дали (приток р. Арпы) [5, т. XII] на некотором участке (рис. 2б)

$$Q = 0,144 + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot H^{0,5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Многие малые реки Армении имеют прямолинейную напорную

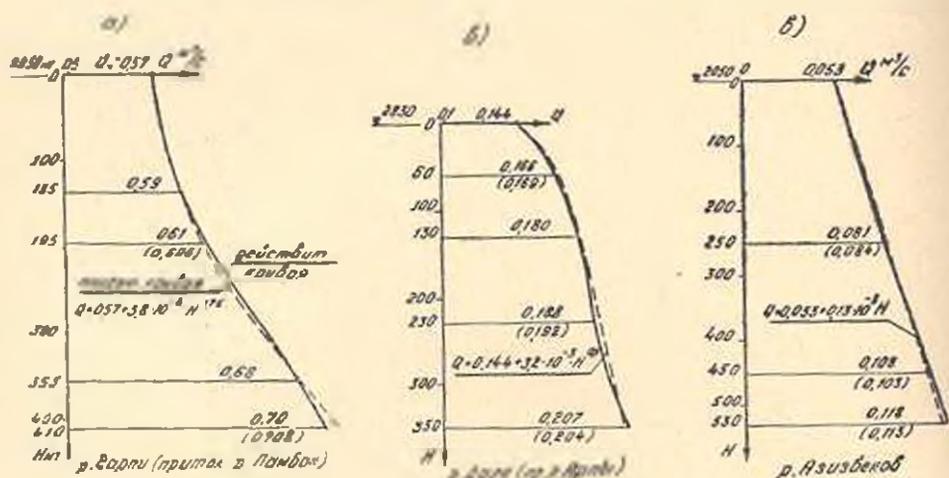


Рис. 2.

характеристику. Например, р. Азизбеков [5, т. XII] на некотором участке (рис. 2в):

$$Q = 0,053 + 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot H \text{ м}^3/\text{с}.$$

р. Акстафа [5, т. VII]

$$Q = 0,42 + 5,7 \cdot 10^{-1} \cdot H \text{ м}^3/\text{с} \text{ и т. д.}$$

Параметры ф-лы (3) определяются методом наименьших квадратов или подбором постоянных коэффициентов.

Если участок реки используется в одной ступени, то напор ее $H_1 = H_{\text{уч}}$ и расход $Q_1 = Q_{\text{н}}$. Здесь $H_{\text{уч}}$ — падение на данном участке

При двух ступенях использования условия задачи следующие:

$$H_1 + H_2 = H_{\text{уч}}$$

$$Q_1 = Q_{\text{н}} \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_1 + \alpha H_1^2$$

Условие максимума выработки энергии на двух ГЭС каскада будет

$$\mathcal{E}_{\text{топ}} = a_r (H_1 Q_1 + H_2 Q_2) = \text{макс.} \quad (5)$$

Здесь $a_r = 9,81 \cdot \eta_r \cdot 8760$.

Поскольку коэффициент a_r — постоянный, то условие получения максимума выработки энергии на участке сводится к простой математической

тической задаче отыскания максимума двухступенчатой площади, вписанной в кривую напорной характеристики рассматриваемого участка и определяемой суммой $H_1 Q_1 + H_2 Q_2$ (заштрихованная площадь на фиг. 3а). Подставляя в (5) значения H_2 и Q_2 из (4), дифференцируя \mathcal{E}_{tot} по H_1 и приравняв нулю имеем:

$$\alpha H_1^{\gamma-1} [\gamma \cdot H_{yч} - (\gamma + 1) H_1] = 0,$$

отсюда:

$$H_1 = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \cdot H_{yч} \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{1}{\gamma + 1} \cdot H_{yч} \quad (6')$$

Из (6) и (6') видно, что оптимальное отношение напоров не зависит от расхода в начале участка Q_0 и от коэффициента α , а зависит только от показателя степени γ . Замечаем также, что при значениях $\gamma > 1,0$, т. е. при вогнутости кривой напорной характеристики, $H_1 > 0,5 \cdot H_{yч}$ и наоборот, при $\gamma < 1,0$, т. е. при выпуклости кривой (3) $H_1 < 0,5 \cdot H_{yч}$.

В таблице 1 приведены оптимальные отношения $\frac{H_1}{H_{yч}}$ и $\frac{H_2}{H_{yч}}$ для разных значений γ .

Таблица 1

γ	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
$\frac{H_1}{H_{yч}}$	0,333	0,43	0,5	0,575	0,6	0,636	0,667	0,693	0,714
$\frac{H_2}{H_{yч}}$	0,667	0,57	0,5	0,445	0,4	0,364	0,333	0,307	0,286

В случае разбивки на три ступени, условиями задачи будут (рис. 3б),

$$H_1 + H_2 + H_3 = H_{yч}$$

$$Q_1 = Q_0; Q_2 = Q_1 + \alpha H_1^{\gamma}$$

$$Q_3 = Q_1 + \alpha (H_1 + H_2)^{\gamma} \quad (7)$$

Условие максимума выработки энергии:

$$H_1 Q_1 + H_2 Q_2 + H_3 Q_3 = \text{макс.} \quad (8)$$

Подставляя в (8) значения Q_2 , Q_3 и H_2 из (7) и дифференцируя по H_1 и H_3 , из условия максимума находим:

$$H_1 = \frac{\gamma \cdot c_1}{\sqrt[\gamma]{c \left(\gamma \cdot c_1 + c_1 - 1 \right)}} \cdot H_{yч} \quad (9)$$

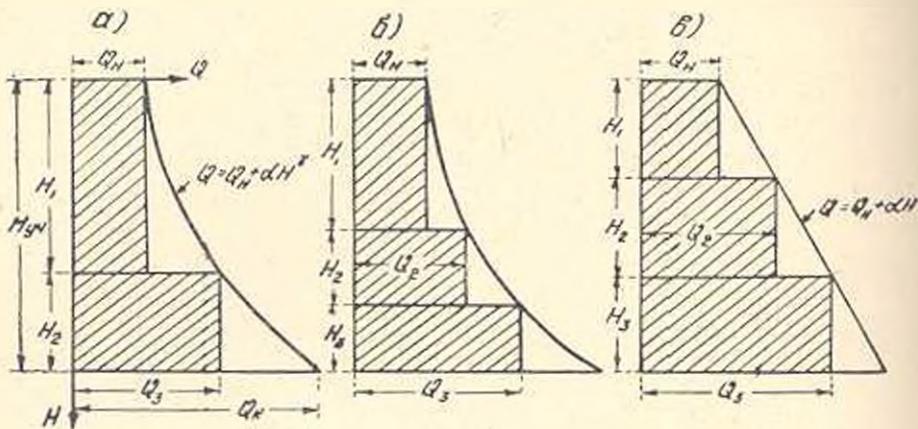


Рис. 3.

$$H_2 = \frac{c_1}{\sqrt{c_1(\gamma \cdot c_1 + c_1 - 1)}} \cdot H_{yч} \quad (9)$$

Из (7) же имеем $H_3 = H_{yч} - H_1 - H_2$;

Здесь введено обозначение $c_1 = \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^2$

В таблице 2 приведены оптимальные отношения $\frac{H_1}{H}$; $\frac{H_2}{H_{yч}}$ и $\frac{H_3}{H_{yч}}$ для разных значений γ .

Таблица 2

γ	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	3,0
$\frac{H_1}{H_{yч}}$	0,13	0,265	0,333	0,393	0,441	0,485	0,522	0,556	0,581	0,628
$\frac{H_2}{H_{yч}}$	0,36	0,353	0,333	0,314	0,294	0,277	0,251	0,247	0,232	0,21
$\frac{H_3}{H_{yч}}$	0,46	0,382	0,333	0,293	0,268	0,238	0,217	0,197	0,187	0,162

Из таблицы видно, что относительный напор первой ступени тем больше, по сравнению с напорами второй и третьей ступеней, чем больше показатель степени γ , напоры второй и третьей ступеней, наоборот, уменьшаются с увеличением γ , причем $\frac{H_3}{H_{yч}}$ в большей мере, чем $\frac{H_2}{H_{yч}}$.

В случае разбивки на четыре ступени аналогичное решение будет:

$$H_1 = \frac{\gamma}{D_1(\gamma + 1) - c_1} \cdot H_{y_1} \quad (10)$$

$$H_2 = \frac{1}{D_1(\gamma + 1) - c_1} \cdot H_{y_1} \quad (10')$$

$$H_3 = \frac{(c_1 - 1)(\gamma + 1)}{\gamma \cdot c_1 D_1(\gamma + 1) - \gamma \cdot c_1} \cdot H_{y_1} \quad (10'')$$

$$H_4 = H_{y_1} - H_1 - H_2 - H_3.$$

Здесь введены обозначения:

$$c_1 = \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^2; D_1 = 1 + \frac{1}{\gamma} + \frac{(c_1 - 1)(\gamma - 1)}{\gamma^2 \cdot c_1}.$$

Ниже приведена таблица 3 оптимальных отношений

$$\frac{H_1}{H_{y_1}}; \frac{H_2}{H_{y_1}}; \frac{H_3}{H_{y_1}} \text{ и } \frac{H_4}{H_{y_1}} \text{ для}$$

Таблица 3

γ	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
$\frac{H_1}{H_{y_1}}$	0,076	0,158	0,25	0,342	0,427	0,502	0,57
$\frac{H_2}{H_{y_1}}$	0,152	0,21	0,25	0,274	0,285	0,280	0,275
$\frac{H_3}{H_{y_1}}$	0,154	0,232	0,25	0,256	0,255	0,215	0,165
$\frac{H_4}{H_{y_1}}$	0,578	0,40	0,25	0,128	0,033	0,003	0,0

разных значений γ . Из таблицы видно, что оптимальные относительные напоры первой и четвертой ступеней при значениях $\gamma \leq 0,5$ и $\gamma > 1,5$ соответственно, сравнительно малы. Следовательно, при небольшом напоре на участке деление его на четыре ступени нецелесообразно.

Из таблиц 1, 2, 3 видно также, что при прямолинейной напорной характеристике ($\gamma = 1,0$) при любом числе ступеней высота участка делится на равные части (рис. 3в).

Аналогичным образом можно решить задачу и в случае разбивки участка на пять, шесть и большее число ступеней.

Полученные выше оптимальные отношения напоров ступеней соответствуют случаю полного использования падения на данном участке. Интересно отметить, что отбросив некоторую верхнюю часть участка, можно получить при одном и том же числе ступеней больше энергии, чем при использовании всего падения на участке. Оптимальная высота отбрасываемой части зависит от характера и параметров

напорной характеристики, а также от заданного числа ступеней каскада.

При одной ступени с учетом отбрасываемой верхней части высотой H_x (рис. 4а) среднегодовая мощность ГЭС будет:

$$N_1 = 9.81 \gamma_2 (H_{yч} - H_x) (Q_n + \alpha H_x^2).$$

Условие максимума мощности запишется в виде:

$$\frac{dN_1}{dH_x} = Q_n + H_x^2 \cdot \alpha \cdot (1 + \gamma) - H_x^{-1} \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot H_{yч} = 0, \quad (11)$$

откуда:

$$H_x = \sqrt[3]{\frac{Q_n}{\alpha \cdot \gamma \cdot (H_{yч} - H_x) - \alpha \cdot H_x}} \quad (11')$$

В общем случае, H_x можно определить из (11') методом последовательного приближения или из (11) — графоаналитическим способом.

В частном случае при $\gamma = 0,5$ из (11) получаем:

$$H_x = \frac{\alpha \cdot H_{yч}}{3\alpha + 2Q_n} \quad (11'')$$

При $\gamma = 1$;

$$H_x = \frac{\alpha H_{yч} - Q_n}{2\alpha} \quad (12)$$

при $\gamma = 2$

$$H_x = \frac{2 \cdot \alpha \cdot H_{yч} \pm \sqrt{4 \cdot \alpha \cdot H_{yч}^2 - 12 \cdot \alpha \cdot Q_n}}{6\alpha} \quad (12')$$

В случае двух ступеней (рис. 4б) при учете H_x меняются оптимальные отношения напоров ступеней определяемые по (6) и (6').

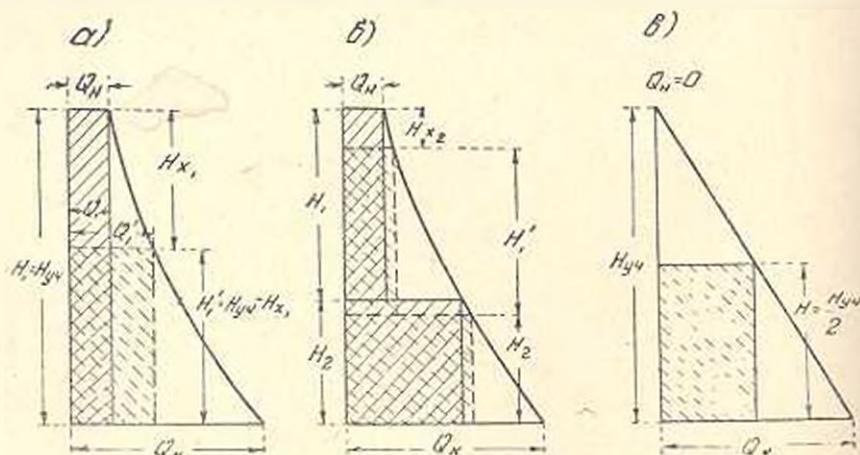


Рис. 4.

Только при прямолинейной напорной характеристике ($\gamma = 1,0$) падение участка укороченное на H_x также делится на равные части.

Суммарная среднегодовая мощность двухступенчатого каскада с учетом H_x будет:

$$\sum_1^z N_i = 9,81 \cdot \gamma \{ H_1 (Q_n + \alpha \cdot H_1^2) + (H_{yn} - H_1 - H_x) [Q_n + \alpha (H_1 + H_x)^2] \} \quad (13)$$

Максимуму $\sum_1^z N_i$ отвечают условия:

$$\frac{\partial \sum_1^z N_i}{\partial H_x} = \alpha \cdot \gamma \cdot H_1 H_x^{-1} - Q_n + \alpha (H_1 + H_x)^2 [\gamma \cdot H_{yn} - (H_1 + H_x)(\gamma + 1)] = 0; \quad (13')$$

$$\frac{\partial \sum_1^z N_i}{\partial H_1} = \alpha H_x^2 + \alpha (H_1 + H_x)^2 [\gamma \cdot H_{yn} - (H_1 + H_x)(\gamma + 1)] = 0; \quad (13'')$$

Совместное решение уравнений (13') и (13''), которое в общем случае легко выполнить графоаналитическим способом, даст оптимальные значения H_x и H_1 .

В частном случае при $\gamma = 1,0$ из (13') и (13'') получаем:

$$H_x = \frac{\alpha H_{yn} - 2 Q_n}{3\alpha} \quad (14)$$

$$H_1 = \frac{\alpha H_{yn} + Q_n}{3\alpha} \quad (15)$$

Аналогичным образом можно поступить в случае трех и более ступеней.

При трех ступенях использования в частном случае когда $\gamma = 1,0$ получаем:

$$H_x = \frac{\alpha \cdot H_{yn} - 3 Q_n}{4\alpha} \quad (16)$$

Для характерного случая прямолинейной напорной характеристики ($\gamma = 1,0$), из трех случаев — одноступенчатого, двухступенчатого и трехступенчатого использования, на основании (12), (14) и (16) можно вывести общую формулу для определения H_x при n — ступенчатом варианте, а именно:

$$H_{x,n} = \frac{\alpha \cdot H_{yn} - n Q_n}{(n+1) \cdot \alpha} \quad (17)$$

или, подставляя значение $\alpha = \frac{Q_n - Q_0}{H_{yn}}$ (где Q_0 — средний используемый расход в конце рассматриваемого участка), будем иметь:

$$H_{x,n} = \frac{H_{yn}}{n} \cdot \frac{Q_n - (n+1) Q_0}{Q_n - Q_0}. \quad (17')$$

При расчете необходимо проверить знак H_x . Последний будет положительным, если $Q_n > (n+1) Q_0$. Отрицательный знак при H_x означает, что в данном случае полное использование падения участка дает

наибольший энергетический эффект, и необходимость в учете H_x отпадает.

Из ф-л (17) и (17') можно сделать вывод, что оптимальное значение H_x тем больше, чем больше коэффициент нарастания расходов α и падение участка H_{yn} и чем меньше число ступеней n .

Для сравнения получаемых энергетических эффектов при разбивке участка реки на различное число ступеней и при полном и неполном (с учетом H_x) использовании падения, определим среднегодовую мощность каскада ГЭС при прямолинейной напорной характеристике.

При полном использовании всего падения участка в одной ступени

$$N_1 = 9,81 \cdot \eta_r \cdot Q_n \cdot H_{yn};$$

или подставляя значение $Q_n = Q_k - \alpha H_{yn}$;

$$N_1 = 9,81 \cdot \eta_r \cdot H_{yn} (Q_k - \alpha H_{yn}).$$

При двух ступенях

$$\sum_1^2 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \left[\frac{H_{yn}}{2} \cdot Q_n + \frac{H_{yn}}{2} \left(Q_n - \alpha \cdot \frac{H_{yn}}{2} \right) \right] = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{H_{yn}}{4} (3Q_n + Q_k)$$

или

$$\sum_1^2 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{H_{yn}}{2} \cdot \left(2 Q_k - \frac{3}{2} \cdot \alpha \cdot H_{yn} \right).$$

При трех ступенях

$$\sum_1^3 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{3} \cdot H_{yn} \cdot (Q_k + 2 Q_n);$$

или

$$\sum_1^3 N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{3} \cdot H_{yn} (3 Q_k - 2 \alpha \cdot H_{yn}).$$

При n ступенях

$$\sum_1^n N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{n} \cdot H_{yn} \left(\frac{n+1}{2} Q_k + \frac{n-1}{2} Q_n \right); \quad (18)$$

или

$$\sum_1^n N_i = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{n} \cdot H_{yn} \left(n \cdot Q_k - \frac{n-1}{2} \alpha \cdot H_{yn} \right). \quad (18')$$

При учете H_x , при одной ступени

$$N_1 = 9,81 \cdot \eta_r \cdot (H_{yn} - H_x) (Q_n + \alpha H_x) = 9,81 \cdot \eta_r \cdot \frac{1}{4\alpha} \cdot Q_k^2$$

(здесь учтено значение H_x из (12) и $Q_n = Q_k - \alpha H_{yn}$, поэтому имеет место при $\alpha H_{yn} > Q_n$).

$$\text{При двух ступенях: } \sum_1^2 N_i = 9,81 \cdot \tau_r \cdot \frac{1}{32} \cdot Q_k^3.$$

$$\text{При трех ступенях: } \sum_1^3 N_i = 9,81 \cdot \tau_r \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{3}{8} \cdot Q_k^3.$$

$$\text{При } n \text{ ступенях: } \sum_1^n N_i = 9,81 \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{n}{2(n+1)} \cdot Q_k^3. \quad (19)$$

Ур-ние (19) действительно при $Q_k \geq (n+1) Q_m$.

Суммарная среднегодовая мощность (или годовая выработка энергии) всех ГЭС каскада, при разбивке участка реки вышеизложенным методом, при одинаковых исходных данных, (напор на участке, вид напорной характеристики, число ступеней) получается больше, чем при разбивке по методам, предложенным в работах [3, 4] и конкретных схемах [5]. Так, например, при прямолинейной напорной характеристике, выработка энергии каскада из 2-х ступеней, при разбивке по предлагаемому методу на 5,5% больше, чем при разбивке по предложенному в литературе [3] методу, а при 3-х ступенях — на 11,5% и т. д. Это увеличение больше при выпуклой напорной характеристике.

Заметим также, что рассчитанные по методам предложенным в литературе [3] и [4], напоры нижних станций получаются значительно больше, чем для верхних (особенно при выпуклой напорной характеристике), что противоречит установленному практикой проектирования целесообразному сочетанию напоров на большинстве горных рек.

Кроме того, предлагаемый метод имеет то преимущество перед указанными выше методами, что может быть использован для составления вариантов схемы использования заданного участка водотока при разном числе ступеней.

Выше изложен энергетический метод разбивки падения реки на ступени. Поскольку энергетические расчеты являются лишь одним из необходимых звеньев энерго-экономического анализа, схемы и основные параметры каскада ГЭС, определенные на основе предлагаемого метода, должны быть проверены и обоснованы энерго-экономическими расчетами.

Действительно, энергетические методы не могут дать окончательного ответа на вопрос об оптимальных параметрах установок. Так, например, из изложенного выше анализа и из ф-л (18), (18') и (19) вытекает, что при оптимальной разбивке падения участка реки суммарный энергетический эффект использования получится тем выше, чем больше число ступеней каскада.

Значит нельзя говорить об определенном оптимальном числе ступеней с чисто энергетической точки зрения, хотя при применении некоторых других методов [3, 4] получается обратный вывод.

Установление оптимального числа ступеней является энерго-экономической задачей.

Но известно, что энерго-экономические расчеты не являются единственным критерием нахождения оптимального варианта, они служат для выявления энерго-экономической эффективности [1]. По инструкции [2] рекомендуется устанавливать целесообразный вариант схемы использования реки с точки зрения достижения максимального энергетического эффекта на рассматриваемом участке. Следовательно, варианты схем энергоспользования реки, с различным числом ступеней, составленные на основе предлагаемого энергетического расчета могут и должны служить основой для варианта технико-экономического анализа.

Оптимальное число ступеней в таком случае можно установить следующим образом. Для различных чисел ступеней производить разбивку по предлагаемому методу, с введением при этом, некоторого корректива, учитывающего местные условия. Затем, определяя энерго-экономические показатели этих вариантов, выбрать вариант, обеспечивающий минимум издержек в системе ($U_c = \text{минимум}$). Если река по гидрологическому признаку разбита на несколько участков, то необходимо произвести выбор из разных комбинаций чисел ступеней на этих участках.

Обычно в суммарных издержках в системе, учитываются как издержки на самой ГЭС, так и по обеспечению регулирующей энергии, необходимой для покрытия графика энерго-потребления. Последняя заменяет недоданную энергию, за счет неполного использования расчетных параметров ГЭС. Но так как с увеличением числа ступеней каскада увеличивается суммарная выработка энергии и уменьшается величина неиспользуемой части энергии водотока, и наоборот, при малом числе ступеней размер неиспользуемой энергии за счет местной приточности увеличивается, то для оценки последней правильнее было бы считать ее как недоданную энергию и оценить ее также, как оценивается заменяющая энергия. Тогда принцип минимума издержек в системе выразится формулой:

$$U_c = \sum_1^n U_i + S_{\text{зам}} \cdot \sum_1^n \mathcal{E}_i - S_{\text{зам}}^* \cdot \sum_1^n \mathcal{E}_i^* = \text{минимум} \quad (20)$$

где: n — число ступеней каскада,

U_i — годовые издержки i -ой ступени (с учетом тяжести капиталовложений),

\mathcal{E}_i — неиспользованная энергия реки на i -ой ступени (рис. 5а),

$S_{\text{зам}}$ — стоимость заменяющей энергии качества \mathcal{E}_i ,

\mathcal{E}_i^* — недоданная энергия i -ой ступени (необходимая регулирующая энергия) (рис. 5б),

$S_{\text{зам}}^*$ — стоимость заменяющей — регулирующей энергии.

Таким образом, можно задать число ступеней n , определить соответствующие издержки U_c и по (20) выбрать оптимальный вариант. В слу-

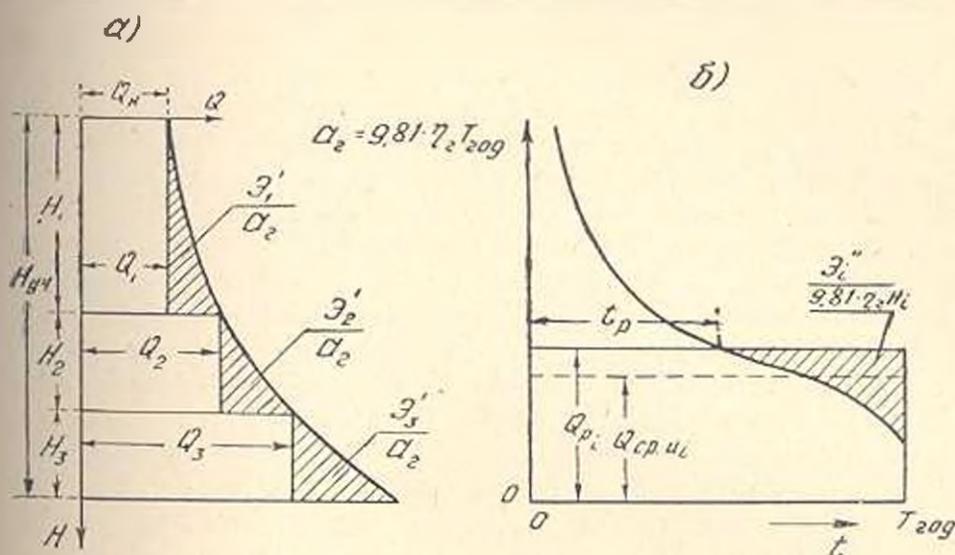


Рис. 5.

чае учета H_x следует соответствующую неиспользуемую часть энергии также считать недоданной, при чем того же качества, что и энергия \mathcal{E}_1 .

Выводы

1. Для энерго-экономического анализа вариантов разбивки падения горной реки на ступени каскада деривационных ГЭС с целью учета энергетических возможностей водотока необходимо составить варианты, отвечающие максимальному энергетическому эффекту (выработка энергии) на каскаде в целом.

При такой разбивке отношение напора каждой ГЭС к общему падению на рассматриваемом участке, зависит от формы напорной характеристики. Оптимальное отношение напоров ступеней для заданного числа ступеней и заданной напорной характеристики можно определить при помощи приведенных в настоящей работе аналитических ф-л или таблиц.

2. В схеме каскада из деривационных ГЭС возможен случай, когда путем отбрасывания некоторой верхней части заданного участка реки и правильной разбивки остальной части, при одном и том же числе ступеней можно получить больший энергетический эффект, чем при использовании всего падения участка. Оптимальная высота отбрасываемой части зависит от параметров напорной характеристики и заданного числа ступеней и определяется аналитическим методом, изложенным в работе.

3. Предлагаемый энергетический метод, в отличие от некоторых существующих методов, исходит из суммарного энергетического эффекта всех ГЭС каскада, на рассматриваемом участке реки при различных числах ступеней каскада. Это дает возможность, при разбивке реки на ступени, более правильно оценивать ее энер-

гетические возможности и варьировать числом ступеней, при составлении вариантов разбивки.

4. Разработанные в настоящей работе методы определения оптимальных напоров деривационных ГЭС могут быть применены для составления рациональных схем использования малых и средних горных рек на предварительной стадии проектирования.

В дальнейших стадиях проектирования такие схемы, составленные для различных чисел ступеней, могут служить в качестве одного из целесообразных вариантов для технико-экономического анализа.

5. Для учета неиспользуемой, вследствие ограниченности числа ступеней, потерянной энергии водотока (энергия за счет притоков между двумя деривационными ГЭС) предлагается оценивать последнюю по стоимости заменяющей энергии в системе и в расчеты включить ее в состав общих издержек для данного варианта.

Водно-энергетический институт

Воступило 8 XII 1956

АИ Армянской ССР

Լ. Ա. ՉԻԼԻՆԳԱՐԻԱՆ

ԼՆԵՐԳԼԻԿԱՆ ԳԵՏԵՐԸ ԳԵՐՈՒԼԱՅԻՐՆ ԼՈՒԳՐԵԿԿԵԿԱՆՆԵՐԻ ԿԱՍԿԱԳԻ ԿԱՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ԲԱԺԱՆՆԵՐԻ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐԸՂ

Ա. մ. փ. ա. փ. ս. լ. մ.

Հոդվածում արվում է լեռնային գետերը չկանոնադրված դերիվաշիան հիդրոկայանների կասկադի աստիճանների բաժանման մեթոդ, ելնելով էներգետիկական նպատակադրմարությունից:

Ի տարբերության գրականության մեջ նայանի նման մեթոդների [3, 4], որտեղ ելնում են ասանձին գիտարկվող հիդրոկայանների մաքսիմում էներգետիկական էֆեկտից (նկ. 1 Ե, Բ), հոդվածում արվում է աստիճանների այնպիսի բաժանման մեթոդ, որը ելնում է գետի գիտարկվող տեղամասի վրա նախազմվող հիդրոկայանների կասկադի զուամարային մաքսիմում էներգետիկական էֆեկտից (տարեկան էներգիայի մաքսիմում արաագրանք), — ալյալ ապահովվածության հաշվարկային ելքերի և ցանկացած թվով աստիճանների դեպքում:

Մոդրի մաթեմատիկական լուծման համար նարմար է օգտվել օգտագործվող միջին ելքերի (լսնածն 1) և գետի գիտարկվող տեղամասի անկման բարձրության կասկ կարից (լսնածն 3, նկ. 2, 3), Այդ կորով և կորգինաանների ասանցքներով ասանմանադրված մակերեսը ըստ մասշտաբի համարժեք է գետի հզորությանը (տարեկան էներգիային) ըստ օգտագործվող միջին ելքերի: Աստի ալյ կարին ներդրված բազմաստիճան մակերեսը (նկ. 3-ում գծերով ծածկված), որի աստիճանների չափերը համապատասխանում են կասկադի աստիճանների բարձրություններին և օգտագործվող միջին ելքերին, ըստ մասշտաբի համարժեք է կասկադի հիդրոկայանների զուամարային միջին հզորությանը: Օգտվելով այս գրութի մաթեմատիկական արտահայտությունից (օր., րսնածն 5, 8), հնարավոր է կասկադի ցանկացած որոշակի թվով աստիճանների համար որոշել գետի գիտարկվող տե-

զամասի անկման այնպիսի բաժանում (առտիճանների միջև), որի զեպքում հիդրոկայանների զուամարային տարեկան էներգիան լինի մաքսիմում: Այդ բաժումը կարելի է հատարել ինչպես գետի գիտարկվող սեղամասի ամբողջ անկումը օգտագործելով (ինչպես ցույց է տված նկ. 3-ում), այնպես էլ այդ անկման վերին որոշ մասը (նկ. 4) հաշվի չառնելով (որի չափը որոշվում է նույն պայմանից):

Լուծումը ցույց է տալիս, որ նշված կորի (բանաձև 3) ուղղազիծ լինելու զեպքում (նկ. 2Յ, 3Յ) կասկադի ամբողջ նստորրը (տեղամասի անկումը) ասանձին հիդրոկայանների միջև բաժանվում է համասար մասերի, բոլոր լինելու զեպքում (նկ. 2Ձ, 3Ձ, 6) վերևի հիդրոկայանների նստորրը ավելի մեծ է ներքևիներից: Ուսուցիչ լինելու զեպքում (նկ. 2Ծ), — բնչհատակը խեղա աղյուսակ № 1, 2, 3):

Հոդվածում նշված զետերի էներգետիկական օգտագործման առաջարկվող մեթոդով կազմված սխեմաները կարող են հիմք հանդիսանալ էներգետնատեսական վերլուծման մեջ, — վերջնական նպատակաւարմար վարիանտի բնարտիքյան համար: Հոդվածում արվում է այդ վերլուծման եղանակը, որը հիմնված է էներգետիկական սխեմում միմյանում շահագործման ծախսեր (հաշված և կադիտայ ներդրման ծանրությունը) ունենալու հանրահայտ սկզբունքի վրա [1, 2]: Այդ սկզբունքը առաջարկվում է արտահայտել (20) բանաձևով, որտեղ բացի կասկադի հիդրոկայանների և էներգետիկական սխեմի ծախսերից (բանաձև (20)-ի աջ մասի 1-ին և 3-րդ անդամները, նկ. 3Ծ), հաշվի է առնվում նաև գետի չօգտագործվող չորսուրթյան (էներգիայի) փոխարինման ծախսերը ((20) բանաձևի աջ մասի 2-րդ անդամը, նկ. 3Ձ), որն արվում է տարբեր վարիանտները մի ընդհանուր էներգետիկական էֆեկտի բերելու համար:

Առաջարկվող մեթոդը կարելի է կիրառել լուծային գետերի էներգետիկական օգտագործման սխեմաների նախնական նախագծման հաշվարկներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Инструкция ВНИИГ. Энергетические расчеты ГЭС. 1945.
2. Инструкция по составлению ТЭД ГЭС. Гидроэнергопроект 1945.
3. Сейфулла Д. О. Анализ энергетического процесса гидроэлектрических станций по особым режимным точкам их характеристик. «Гидротехническое строительство», № 8, 1950.
4. Семенов В. В. Гидроэнергетические основы расчета схемы каскада ГЭС. Труды МЭИ, выпуск XII, 1952.
5. Схема энергоспользования малых рек Армянской ССР для электрификации сельского хозяйства. ВЭНИ АН Армянской ССР, т. 1—XIV, 1949 г. (машинпись).

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

И. А. ТЕР-АЗАРЬЕВ

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КОНТАКТА РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ
НА УСИЛИЯ ПРИ РЕЗАНИИ КАМНЯ

Контакт режущих кромок инструмента при резании характеризуется тремя основными видами (рис. 1):

а) Контакт с обрабатываемым материалом осуществляется лишь главной режущей кромкой. Резание при таком контакте режущей кромки называется свободным.

б) Резание при контакте главной режущей кромки и одной из вспомогательных режущих кромок, называемое полусвободным.

в) Резание при контакте главной режущей кромки и двух вспомогательных кромок, называемое несвободным.

Тот или иной характер контакта режущих кромок является особенностью осуществляемого метода резания. К примеру, полусвободное резание осуществляется во всех случаях обработки торцевым фрезированием, точением, строганием и т. д. Случаи несвободного резания характерны при работе дисковых пил, отрезных фрез и баров различной конструкции, при отрезке на токарных и строгальных станках и т. п. Свободное резание, как самостоятельный случай, в практике камнеобработки не имеет места. Однако, при установке зубков дисковых пил или баров в несколько позиций может иметь место и свободное резание. Так например, при установке зубков в три позиции, первый и второй работают в условиях несвободного резания, а третий — в условиях свободного резания, что наглядно видно на рис. 2.

При другом расположении зубков можно получить сочетания других видов контакта — несвободного с полусвободным или всех видов контакта одновременно.

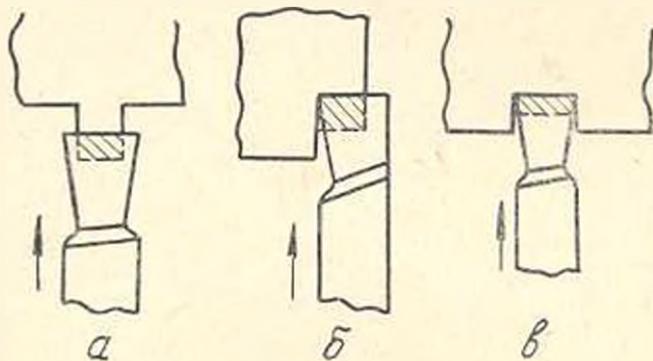


Рис. 1.

Исходя из приведенных выше соображений, а именно того, что тот или иной характер контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом связан с осуществляемым методом резания, сравнительная их оценка с точки зрения динамических показателей процесса представляет несомненный интерес.

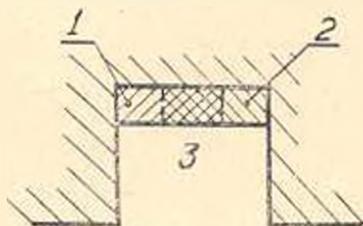


Рис. 2.

Полноценный сравнительный анализ является весьма сложной и трудоемкой задачей, учитывая, что в каждом отдельном случае динамические показатели являются функцией многих переменных: скорости резания, подачи, глубины резания, геометрии инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого материала и т. д. При этом, для установления влияния одной лишь геометрии необходимо исследование всех отдельных ее элементов, как-то: переднего угла, заднего угла, главного и вспомогательного углов в плане, формы очертания режущей кромки и т. д. В данной статье определяется влияние толщины и ширины среза, а также переднего угла на удельные усилия при резании фельзитового туфа.

Учитывая, что неоднородность обрабатываемого материала могла оказать существенное влияние на конечные результаты, для экспериментов был взят сравнительно однородный туф корплинского месторождения с $\sigma_{сж} = 480 \text{ кг/см}^2$. Усилия резания фиксировались с помощью датчиков сопротивления с соответствующей записью на трехшлейфовом осциллографе.

В качестве регистрирующего шлейфа был использован высокочувствительный рамочный шлейф. Частотная характеристика шлейфа разрешала осуществлять резание с весьма малыми скоростями резания так, чтобы частота процесса не превышала 50—60 герц. Все опыты велись на станке, разрешающем обеспечить независимое изменение толщины среза с ценой деления соответствующего лимба 0,05 мм.

При осуществлении несвободного резания были соблюдены следующие условия, имеющие важное значение. Как известно, при осуществлении несвободного резания в целом хрупком материале, разрушению подвергается большой объем в предрезцовой зоне, напряжения в котором перешли предел прочности материала. При этом зона разрушения захватывает объем материала, расположенного вне траектории движения боковых кромок инструмента (рис. 3).

В поставленных опытах резание осуществлялось таким образом, чтобы боковое разрушение материала исключалось, а разрушение осуществлялось лишь в пределах непосредственного действия контактной площадки передней грани резца вдоль пути его перемещения. Для этого, резец при малых толщинах среза углублялся в материал до тех пор, пока при требуемой для опытов толщине и ширине среза не соблюдались необходимые условия.

Применяемые в опытах резцы были армированы твердым сплавом марки ВК8. Изменение ширины среза обеспечивалось сменными резцами различной ширины. Геометрия резцов в основных опытах была принята следующей: $\alpha = 10 - 12^\circ$, $\gamma = 0$, $\lambda = 0$, $\varphi = 0$, $\varphi_1 = 4^\circ$.

Опыты проводились при острой состоянии режущих кромок инструмента. Тарировка осуществлялась статическая с помощью грузов, подвешиваемых на соответствующем плече с точечной опорой.

На рис. 4 в логарифмической сетке приведено влияние толщины среза на удельные усилия в зависимости от ширины среза при свободном резании.

Из приведенных данных видно, что с увеличением толщины среза удельные усилия уменьшаются. Зависимость между удельными усилиями и толщиной среза может быть в общем виде представлена в виде уравнения гиперболы:

$$p = \frac{C_1}{a^2} = \frac{0,74}{a^{2,02}} \text{ кг/мм}^2$$

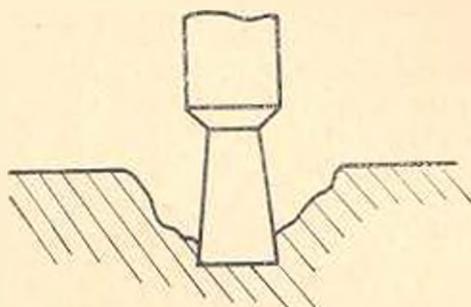


Рис. 3.

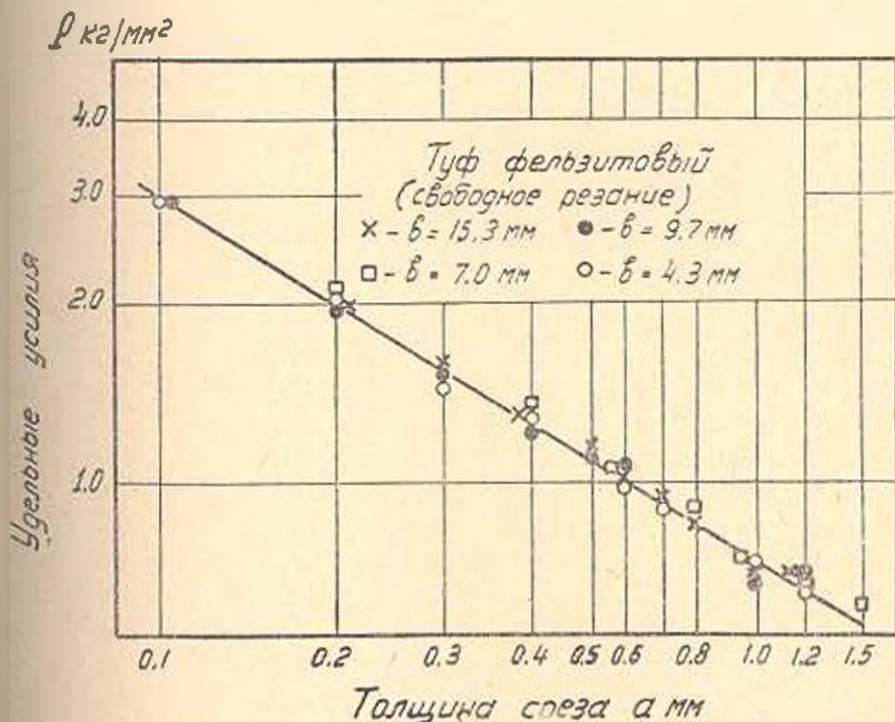


Рис. 4.

Ширина среза, в исследованных пределах, не оказывает влияния на величину удельного усилия резания. Характерным моментом, имеющим место при свободном резании является то обстоятельство, отмеченное еще раньше К. Мнджояном [1], что при определенных соотношениях толщины среза к ширине ее, нарушается правильность откола. Линия скола элемента заходит за обработанную поверхность, оставляя на ней рванины, т. е. вместо резания фактически имеет место как бы отрыв материала, что приводит к резкому понижению среднего значения удельного усилия резания.

К сожалению, установление этой критической зоны—задача довольно сложная вследствие неоднородности обрабатываемого материала.

При полусвободном резании (рис. 16), общий характер влияния толщины среза на удельные усилия остается таким же, как и при свободном резании и зависимость выражается уравнением того же вида:

$$p = \frac{C_1}{a^{x_1}} = \frac{C_1}{a^{0,6}} \text{ кг/м.м}^2$$

То обстоятельство, что показатель степени $x_1=0,6$, подтверждает достоверность полученных ранее данных по влиянию подачи на удельные усилия, при другой методике измерения усилий [2].

На рис. 5 представлено влияние ширины среза „ b “ на удельные

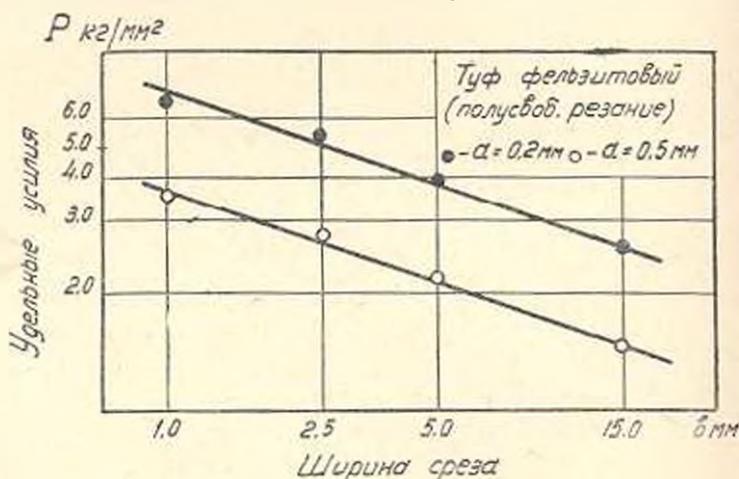


Рис. 5.

усилия в зависимости от толщины среза „ a “ при полусвободном резании. В рассматриваемом случае зависимость может быть представлена уравнением.

$$p = \frac{C_2}{b^{x_2}} = \frac{C_2}{b^{0,22}} \text{ кг/м.м}^2$$

В общем виде влияние толщины и ширины среза на удельные усилия, в условиях полусвободного резания, выражается следующей формулой:

$$p = \frac{C}{a^x \cdot b^y} = \frac{2,35}{a^{0,6} \cdot b^{0,32}} \text{ кг/м.м}^2$$

Как характерное явление при полусвободном резании следует отметить то обстоятельство, что при больших отношениях $\frac{a}{b}$ наблюдается выламывание со стороны свободного ребра сжимаемого слоя на значительную длину до 2—3 см, что однако почти не влияет на величину удельных усилий.

На рис. 6 представлены данные по влиянию толщины среза на удельные усилия при различной ширине снимаемого слоя (от 2,4 до 16 мм), в условиях несвободного резания.

Из приведенных данных видно, что характер зависимости удель-

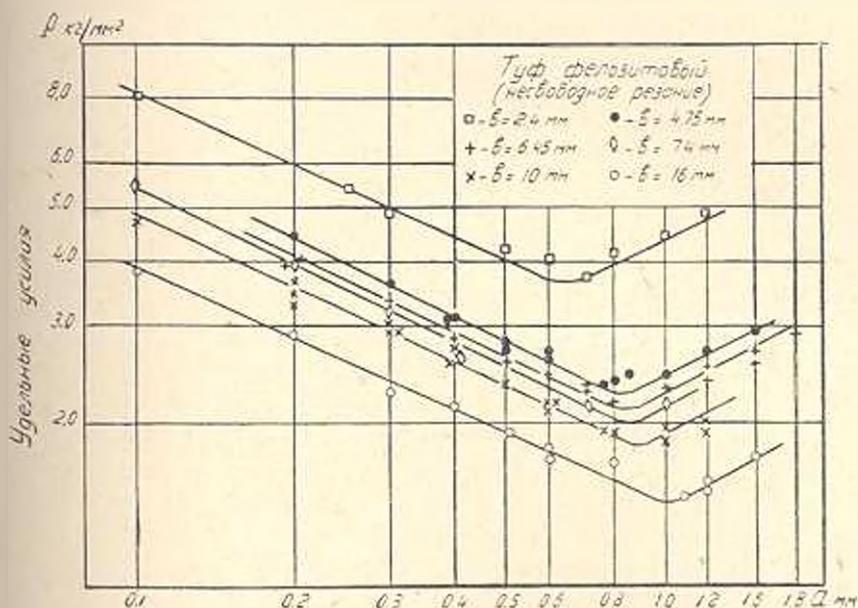


Рис. 6.

ных усилий от толщины среза при несвободном резании отличен от той же зависимости при свободном и полусвободном резании. Отличительной особенностью является перегиб кривой при определенной толщине среза, после которой удельные усилия с увеличением толщины увеличиваются.

Помимо перегиба кривой в определенной зоне, степень влияния толщины среза на удельные усилия до точки перегиба меньше, чем при свободном и полусвободном резании. В самом деле, зависимость эта выражается уравнением вида:

$$p = \frac{C_1}{a^{0,5}} \text{ кг/м.м}^2$$

Малая степень влияния толщины среза на удельные усилия, а также перегиб кривой в сторону увеличения является очевидно особенностью данного вида резания. Полное представление в этом вопросе было бы в том случае, если вопросы свободного, полусвободного и несвободного резания были бы решены методами строгой теории. Отсутствие этих данных даже для самого простого случая свободного резания затрудняет полноценный анализ. Однако, можно предположить, что наличие зоны роста удельных усилий с увеличением толщины среза является следствием того, что в процессе резания боковой отрыв материала и боковое трение инструмента становятся преобладающими. Точка перегиба кривой для различных шириин соответствует различным толщинам среза. С увеличением ширины среза, толщина среза, соответствующая перегибу кривой, увеличивается.

На рис. 7 приведена графическая зависимость критической толщины среза, соответствующая перегибу кривой, в зависимости от ширины среза.

Аналитическое выражение этой зависимости имеет вид степенной функции:

$$a_{кр} = C^1 \cdot b^y = 0,52 b^{0,73} \text{ м.м.}$$

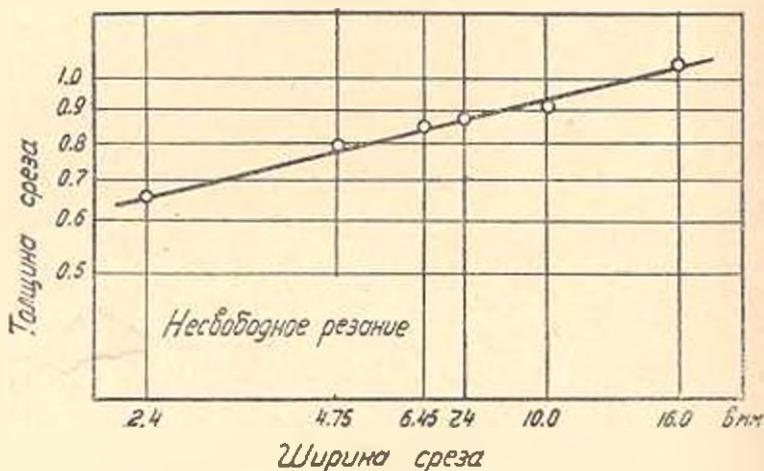


Рис. 7.

Зависимость удельных усилий от ширины среза в зоне перегиба с достаточной точностью может быть также выражена уравнением степенного вида.

Влияние переднего угла на удельные усилия при несвободном резании устанавливалось при значениях переднего угла $\pm 17^\circ$, 0° и -15° . На рис. 8 приведены опытные данные, из которых видно, что увеличение переднего угла приводит к уменьшению удельных усилий.

Эти результаты хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными по влиянию переднего угла на усилия резания при свободном и полусвободном резании.

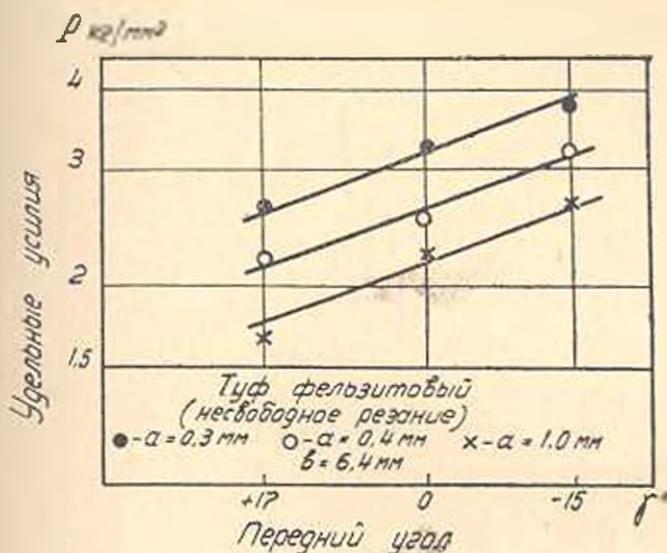


Рис. 8.

Выводы

1. Абсолютное значение удельных усилий в условиях постоянно-го сечения среза и постоянства отношения $\frac{a}{b}$ зависит от характера контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом. Наибольшие значения удельных усилий соответствуют условиям несвободного резания, наименьшие — условиям свободного резания.

2. Зависимость удельных усилий от ширины и толщины среза в общем виде выражается уравнением:

$$p = \frac{C}{a^{x_2} b^{x_1}} \text{ кг/мм}^2.$$

При этом для свободного резания $x_2 \approx 0$; $x_1 = 0,62$; $C = 0,74$, для полусвободного резания $x_2 = 0,32$; $x_1 = 0,6$; $C = 2,35$, а для несвободного резания $x_2 = 0,4$; $x_1 = 0,5$; $C = 3,95$. В последнем случае зависимость, приведенная выше, справедлива до значений критической толщины среза, которая связана с шириной среза уравнением:

$$a_{кр} = 0,52 b^{0,25} \text{ м.м.}$$

При больших значениях толщины среза в условиях несвободного резания, удельные усилия имеют тенденцию к повышению.

3. С увеличением переднего угла удельные усилия, а следовательно, и энергосиимость процесса уменьшается. Однако при установлении рационального значения переднего угла в производственных условиях, следует принимать во внимание износ и жесткость режущей кромки инструмента.

4. При проектировании режущих органов камнеобрабатывающих

инструментов, следует по возможности стремиться к максимальному уменьшению числа зубков, работающих в условиях несвободного резания. При невозможности соблюдения этого условия, следует максимально увеличить ширину зубков, работающих в условиях несвободного резания с тем, чтобы толщина среза при данной ширине зубка не была бы больше критической.

Институт стройматериалов и сооружений
АН Армянской ССР

Поступило 27 X 1956

Ի. Ա. ՏԵՐ-ԱԶԱՐՅԵՎ

ԿՏՐՈՂ ԵՋՐԻ ԿՈՆՏԱԿՏԻ ՁԵՎԻ ԱՂԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ
ՈՒՃԵՐԻ ՎՐԱ ՔԱՐԻ ԿՏՐՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ք ռ լ մ լ մ

Հսկվածում պարզարտնվում են ֆելզիտային տուֆի ազատ, կիսա-ազատ և ոչ ազատ կարման գեպրում տեսակարար ուժերի կտրման հարցերը: Երասպերիմենտայ սվյալների հիման վրա, որ բուսացված են օսցիլո-գրաֆի վրա գրանցման ճշգրիտ եզանտիով, սահմանված են տեսակարար ուժերի փոփոխման և օրինաչափությունների կախված հատածքի (սրեզա) հաստությունից, լայնությունից և նրանց հարաբերությունից զործիքի կրող եզրի և մշակվող նյութի կանտակտի վերահիշյալ երևք հիմնական ձևերի դեպքում:

Ստացված արդյունքները հնարավորություն են տալիս ճշգրիտ հաշվարկել մեխանիզմի ուժային մասը զանազան տիպի քարամշակ և քարհան, տարրեր տիպի կարող օրգաններով հաստացներ նախագծելիս:

Л И Т Е Р А Т У Р А

- К. А. Миджонн. Эффективность виброрезания естественных строительных камней. Диссертация. Ленинград, 1951
И. А. Тер-Азарьев. Роль подачи при резании естественных камней. Известия АН Арм. ССР, т. IX, № 2, 1956.

ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

В. М. ХУДАВЕРДЯН

ВТОРИЧНОЕ ТВЕРДЕНИЕ ЛЕТНЕГО БЕТОНА ПРИ ЕГО ОБВОДНЕНИИ

При проведении исследований по летнему бетону [1], т. е. бетону, вызреваемому в сухой и жаркой среде при интенсивном испарении из него влаги, нам, для объяснения некоторых результатов опытов, пришлось предположить, что при последующем обводнении (водополощении) этого бетона имеет место его вторичное твердение и упрочнение.

Под вторичным твердением здесь понимается возобновление процесса твердения бетона, прерванного вследствие испарения его внутренней влаги. В отличие от первичного твердения, когда сырая бетонная смесь превращается в твердое бетонное тело, вторичное твердение бетона может произойти многократно соответственно условиям обводнения.

Для проверки указанного предположения в 1954 г. были поставлены прямые опыты. Были приготовлены образцы из 4 видов бетона: тяжелого — на базальтовом щебне и кварцевом песке, литондпемзобетона (бетона на литондной пемзе), туфобетона на вулканическом туфе ереванского типа и пемзобетона на зинийской и пемзашенской пемзе. Все бетонные смеси были приготовлены на цементе Араратского завода активностью $R_d = 425 \text{ кг/см}^2$ при одинаковом расходе цемента — 250 кг/м^3 и одинаковой пластичной консистенции с осадкой конуса 7 см.

Бетонные образцы в виде призм $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$ и кубиков $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ были приготовлены вибрированием на лабораторной виброплощадке.

После однодневного хранения в формах во влажных условиях образцы были расформованы, при этом часть их помещена в специальную летнюю камеру со стабильным режимом (температура $28-32^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха $30-35\%$), а другая часть — во влажную камеру и твердела в нормальных воздушно-влажных условиях.

Из числа образцов, хранящихся в летней камере, 3 призмы и 3 кубика из каждого вида бетона в возрасте 36—44 дня были помещены в воду на 9 дней, затем извлечены из воды, высушены и испытаны: призмы — на динамический модуль упругости, кубики — на сжатие. Высушивание образцов до испытания производилось с целью исключения влияния влажностного состояния бетона на его упругие и прочностные показатели.

Определение динамического модуля упругости представляло методическое удобство, ибо давало возможность проследить за поведением образца до и после его обводнения, не прибегая к его разрушению.

Для выявления эффекта обводнения летнего бетона были испытаны, параллельно с обводненными, также и контрольные образцы, не подвергшиеся обводнению.

Выбор и испытание контрольных образцов понятии из табл. 1 и 2, где сведены результаты всех испытаний.

Ввиду принципиальной важности полученных результатов было решено проверить их воспроизводимость, особенно в отдаленные сроки обводнения и получить ответ на вопрос—не затухает ли с течением времени способность летнего бетона к вторичному твердению при обводнении? С этой целью 3 призмы и 3 кубика из каждого вида бетона летнего (воздушно-сухого) хранения были обводнены в

Таблица 1

Эффект повышения динамического модуля упругости E летних бетонов при их обводнении

Вид бетона	№№ образцов		Условия и продолжит. хранения в днях			Дата испытания	$E \cdot 10^{-3}$ в кг/см ² (средн.)	Увеличение E от обводнения в %
	конт. родных	обводненных	воздушно-влажных	воздушно-сухих (в летн. камере)	воднос			

Обводнение в возрасте 36—44 дн.

Тяжелый бетон	10—12		35	—	—	15.X.1954	290	—
	16—18		1	31	—	15.X.1954	124	—
	13—15		1	55	—	5.XI.1954	122	—
Литоидпемзобетон		16—18	1	35	9	5.XI.1954	178	46
	28—30		35	—	—	26.X.1954	130	—
	31—32		1	31	—	26.X.1954	70	—
	31—33		1	58	—	19.XI.1954	75	—
Туфобетон		34—36	1	35	9	19.XI.1954	102	36
	41—48		41	—	—	3.XI.1954	139	—
	52—54		1	40	—	3.XI.1954	71	—
	49—51		1	62	—	26.XI.1954	74	—
Пемзобетон		52—54	1	41	9	25.XI.1954	99	34
	64—66		10	—	—	13.XI.1954	80	—
	70—72		1	39	—	13.XI.1954	44	—
	67—69		1	66	—	10.XII.1954	43	—
.		70—72	1	43	9	10.XII.1954	49	14

Обводнение в возрасте 744—768 дней

Тяжелый бетон	13—15		1	767	—	17.X.1956	96	—
		13—15	1	767	14	5.I.1957	141	47
Литоидпемзобетон	31—33		1	756	—	17.X.1956	75	—
		31—33	1	756	14	5.I.1957	103	37
Туфобетон	49—51		1	754	—	17.X.1956	70	—
		49—51	1	754	14	5.I.1957	95	36
Пемзобетон	67—69		1	743	—	17.X.1956	44	—
	.	67—69	1	743	14	5.I.1957	44	0

Таблица 2
Эффект повышения прочности на сжатие $R_{сж}$ летних бетонов при их обводнении

Вид бетона	Название образцов	Условия и продолжит. хранения в днях			Дата испытаний	$R_{сж}$ в кг/см ² (средн.)	Увеличение $R_{сж}$ от обводнения в %
		воздушно-влаж. пос.	воздушно-сухое (в летн. камере)	вопрос			
Обводнение в возрасте 36—44 дн.							
Тяжелый бетон	Контрольн.	1	60	—	10.XI.1954	134	—
	Обводненн.	1	35	9	10.XI.1954	186	39
Литондпемзобетон	Контрольн.	1	59	—	20.XI.1954	97	—
	Обводненн.	1	35	9	20.XI.1954	125	29
Туфобетон	Контрольн.	1	65	—	18.XI.1954	120	—
	Обводненн.	1	41	9	18.XI.1954	165	37
Пемзобетон	Контрольн.	1	74	—	18.XI.1954	65	—
	Обводненн.	1	43	9	18.XI.1954	78	20
Обводнение в возрасте 718—742 дн.							
Тяжелый бетон	Контрольн.	1	791	—	10.XI.1954	90	—
	Обводненн.	1	741	14	10.XI.1954	159	77
Литондпемзобетон	Контрольн.	1	780	—	10.XI.1954	93	—
	Обводненн.	1	730	14	10.XI.1954	148	59
Туфобетон	Контрольн.	1	778	—	10.XI.1954	102	—
	Обводненн.	1	728	14	10.XI.1954	142	39
Пемзобетон	Контрольн.	1	767	—	10.XI.1954	74	—
	Обводненн.	1	717	14	10.XI.1954	72	—

2-летнем возрасте путем помещения их в воду на 14 дней, затем извлечены из воды, высушены и испытаны. Здесь также испытывались контрольные образцы, каковыми для призм являлись сами же, подлежащие обводнению, призмы, динамический модуль упругости которых определялся до и после их обводнения. Контрольными кубиками являлась группа близнецов летнего хранения.

Результаты 2-годичных испытаний также сведены в табл. 1 и 2.

Рассматривая все данные табл. 1 и 2, приходим к следующим выводам:

1. При обводнении летнего бетона имеет место его вторичное твердение и упрочнение

Это положение может быть объяснено следующим образом. Известно, что в затвердевшем цементе не все количество вяжущего оказывается химически связанным с водой и ядровые части цементных зерен остаются незатронутыми ею. Во влажных условиях твердения влага постепенно проникает вглубь цементных зерен и запасы нереактивированного цемента медленно убывают. Но все же, в течение длительного времени в затвердевшем цементе имеются известные запасы нереактивированного цемента, способного вступить во взаимодействие с водой.

„Даже через несколько месяцев твердения цемента внутренняя часть его зерен наиболее крупных, еще не успевает вступить в реакцию с водой. При повторном помоле затвердевшего цемента и смешивании с водой он может снова твердеть, но прочность получается уже невысокой“ [2].

Способностью нереагированного цемента вступить в реакцию с водой при условии вскрытия ядер его зерен объясняется явление, при котором раздавленный под прессом, но не рассыпавшийся образец бетона, уже неспособный воспринять нагрузку, при хранении в воде приобретает способность вновь сопротивляться нагрузке [3]. Механизм этого явления заключается в том, что вода проникая по трещинам бетона к нереагированным частицам цемента вступает с ними в реакцию.

Формирование и дальнейшее твердение летнего бетона происходит в условиях острой нехватки влаги. В известный срок, меньший для тяжелого бетона и несколько больший для легких бетонов на пористых заполнителях, способных аккумулировать при затворении влагу, испаряется из бетона вода затворения и он высыхает. Тогда прекращается химическое взаимодействие цемента с водой в силу отсутствия последней, рост прочности бетона приостанавливается и он не достигает своих марочных показателей. Вследствие этого в летнем бетоне, по сравнению с бетоном нормального влажного твердения, должны иметься значительно большие запасы нереагированного цемента. При таком положении последующее реагирование этого цемента с водой не требует вскрытия внутренних поверхностей бетона, т. е. его предварительного разрушения, и в летнем бетоне этот процесс происходит неструктурно, через капиллярные ходы при обводнении бетона. Вода добирается до цементных запасов в неразрушенном бетоне, начинается его вторичное твердение и он упрочняется. Возможно, что этому в известной мере способствует развитая сеть микротрещин в летнем бетоне.

Факт упрочнения туфобетона 4-летнего воздушного хранения в результате его последующего длительного водопоглощения отмечен в работе К. С. Карапетяна [4]. К этой работе мы вернемся ниже.

В конце 1956 г., при проведении второго цикла наших опытов по вторичному твердению летних бетонов над образцами 2-летнего воздушно-сухого хранения, нам стало известно из заметки [5], что упрочнение бетона сухого хранения при его водопоглощении выявлено также новейшими английскими исследованиями. К этой заметке, с некоторыми утверждениями которой мы не согласны, вернемся ниже.

2. Вторичное твердение тяжелого летнего бетона при обводнении происходит в большей мере, нежели легких бетонов

Ранее нами было показано [6], что при вызревании в летних условиях тяжелый бетон не достигает своих марочных показателей в большей мере, нежели легкие бетоны, которые сухость среды переносят с меньшим ущербом. Это было объяснено тем, что при затво-

рени легких бетонов пористые заполнители поглощают значительную часть водной добавки, которая затем расходуется на поддержание изнутри влажностного состояния бетона. Этого преимущества тяжелый бетон лишен в силу плотной структуры своих заполнителей. Поэтому открытое твердение его летом в воздушно-сухой среде происходит в условиях более острого недостатка влаги, нежели легких бетонов, в результате чего нереагировавшего цемента в нем остается больше, и, стало быть, вторичное твердение его при последующем обводнении должно быть более существенным.

Летний пемзобетон проявляет наименьшую способность к вторичному твердению при обводнении, что должно быть объяснено его структурными особенностями. Вопрос этот нами изучается.

3. Способность хранящегося в воздушно-сухих условиях летнего бетона к вторичному твердению при обводнении со временем не ослабевает

В наших опытах тяжелый бетон, литоидпемзобетон и туфобетон свою потенциальную способность к вторичному твердению при обводнении сохранили в течение двух лет в полной мере.

Исключение составляет пемзобетон.

Таким образом, если оставить в стороне пемзобетон, то в летнем бетоне при сухих условиях его хранения имеет место надежная консервация нереагировавшего цемента.

4. Легкие бетоны на пористых заполнителях, формировавшиеся и твердевшие в воздушно-сухих условиях, при дальнейшем хранении их в этих же условиях не снижают уже приобретенных упругих и прочностных показателей

Этот вывод хоть и не имеет прямого отношения к вопросу о вторичном твердении бетона, но сам по себе является важным для распознавания поведения легких бетонов.

Эти бетоны, твердея с самого же начала в воздушно-сухих условиях, постепенно обезвоживаются. Испарение захваченных ими при затворении значительных количеств влаги происходит медленно, в течение нескольких недель. За это время условия твердения бетонов хоть и далеки от нормально-влажных, но все же они успевают приобрести значительную долю своих марочных показателей, оформляются структурно, а при дальнейшем хранении в воздушно-сухих условиях хоть и не повышают своих прочностных и упругих показателей, но и не сдают их.

В отличие от легких бетонов, тяжелый бетон менее приспособлен к летним условиям вызревания. Если твердение его все время происходит в воздушно-сухих условиях, то захваченный при затворении небольшой запас влаги, он, по сравнению с легкими бетонами, теряет скорее и до окончательного высыхания успевает набрать меньшую долю своих марочных показателей. При дальнейшем хранении

в летних условиях тяжелый бетон, как показывают данные табл. 1 и 2, заметно снижает свои упругие и прочностные показатели. Однако мы пока воздерживаемся от вывода о невоздухостойкости этого бетона и вопрос этот нами дополнительно изучается.

5. Необходимо критически пересмотреть и выправить методику различных испытаний во всех тех случаях, когда она связана с выдерживанием цементных или бетонных образцов в воде и это может вызвать их упрочнение в результате вторичного твердения

Для примера рассмотрим принятую методику испытания бетона на морозостойкость.

Согласно ГОСТ 4800—49 подлежащие замораживанию бетонные образцы за 4 дня до начала замораживания помещают в воду, контрольные же образцы продолжают хранить в прежних условиях до эквивалентного возраста, и за 4 дня до испытания на сжатие их также помещают в воду для насыщения. В итоге замораживаемые образцы обводняются дольше, чем контрольные, ибо после каждого цикла замораживания их помещают в воду на 4 часа для оттаивания. В силу этого процент водопоглощения у замораживаемых образцов выше, чем у контрольных, чем объясняется наблюдаемое в опытах увеличение первоначального веса замораживаемых образцов при условии отсутствия внешних признаков их разрушения [1]. Поэтому в случае испытания на морозостойкость летнего бетона, содержащего значительные запасы неореагированного цемента, замораживаемые образцы, благодаря более длительному обводнению, упрочняются в большей мере, нежели контрольные образцы, что может существенно исказить результаты испытания на морозостойкость.

Этим следует объяснить полученные в предыдущих исследованиях [1, 7] неизменно высокие показатели морозостойкости (по ГОСТ 4800—49) бетонов, вызревших в условиях сухого и жаркого климата, а нередко и значительно более высокую прочность прошедших 50 циклов попеременного замораживания и оттаивания образцов этих бетонов по сравнению с прочностью контрольных образцов.

Здесь нужно отметить еще следующее. Степень упрочнения образцов летнего бетона зависит не только от продолжительности их обводнения, но и от того—когда они обводняются. Подлежащие замораживанию образцы обводняются в течение 4 дней до начала замораживания, контрольные же образцы—перед испытанием на сжатие. В силу этого у замораживаемых образцов вторичное твердение начинается за 4 дня до начала их замораживания и продолжается все время прохождения или положенного числа циклов попеременного замораживания и оттаивания вплоть до испытания их на сжатие, между тем как у контрольных образцов вторичное твердение происходит лишь в последние 4 дня перед испытанием на сжатие. Уже это обстоятельство порождает неодинаковую степень упрочнения замораживаемых

и контрольных образцов, если даже оставить в стороне усугубляющее эту разность дополнительное обводнение замораживаемых образцов при их оттаивании.

В свете сказанного в методику испытания бетонов на морозостойкость по ГОСТ 4800—49 должны быть внесены следующие исправления.

1. За 4 дня до начала замораживания должны быть помещены в воду не только образцы, подлежащие замораживанию, но и контрольные, после чего первые переводятся в холодильник, а контрольные— в камеру нормальной влажности на воздушное хранение.

2. После каждого цикла замораживания должны помещаться в воду, помимо замораживаемых образцов, также и контрольные, — на 4 часа, после чего первые переводятся в холодильник, а контрольные— на воздушное хранение в камере нормальной влажности.

Здесь можно идти на некоторое упрощение, довольствуясь следующим: за 4 дня до начала замораживания должны быть помещены в воду как образцы, подлежащие замораживанию, так и контрольные, после чего первые переводятся в холодильник и подвергаются попеременному замораживанию и оттаиванию по принятой методике, контрольные же образцы продолжают хранить в воде в течение дополнительного срока $= \frac{n \cdot 4}{24} = \frac{n}{6}$ дней, где n — намечаемое число циклов

попеременного замораживания и оттаивания; затем их переводят в камеру нормальной влажности и хранят до эквивалентного возраста, после чего испытывают вместе с образцами, прошедшими n циклов попеременного замораживания и оттаивания. При этом общая продолжительность обводнения, контрольных и замораживаемых образцов будет одинакова: $4 + \frac{n}{6}$ дней.

Таким образом изменение, предлагаемое внести в ГОСТ 4800—49, сводится к тому, что контрольные образцы необходимо поместить в воду не перед их испытанием и не на 4 дня, а за 4 дня до начала замораживания на $4 + \frac{n}{6}$ дней. В остальном ГОСТ 4800—49 остается без изменений.

При соблюдении этих условий будет устранена возможность искажения результатов испытания на морозостойкость от упрочнения бетона.

При испытании на морозостойкость бетонов указанное изменение ГОСТ 4800—49 будет способствовать также достижению одинаковых коэффициентов водопоглощения и размягчения контрольных и замораживаемых образцов.

В качестве второго примера рассмотрим методику интересных опытов К. С. Карапетяна [4]. Автор проводил исследование ползучести легкого бетона. Им была принята обобщенная гипотеза, согласно

которой ползучесть бетона является следствием как вязкости гелевой структурной составляющей цементного камня, так и капиллярных явлений. Для проверки второй части этой гипотезы автор проводил опыты над цилиндрическими образцами ($d = 14$ см, $h = 60$ см) туфобетона четырехлетнего воздушного хранения при относительной влажности воздуха 40–60%, принимая, что при этом ползучесть за счет вязкости геля исключается.

Для определения влияния капиллярных явлений на ползучесть бетона были поставлены на длительную нагрузку при напряжении 20 кг/см² 2 группы образцов-близнецов: одна группа после 150-дневного хранения в воде, другая группа в сухом состоянии, без предварительного водонасыщения.

Для получения исходных характеристик бетона, вначале нагружения образцов длительной нагрузкой особые цилиндрические образцы ($d = 14$ см, $h = 28$ см) были испытаны на сжатие и на модуль упругости при сжатии. При этом прочность и модуль упругости бетона (при напряжении $0,5 R_{бет}$) сухих образцов соответственно получились 97 кг/см² и 18000 кг/см²; то же для бетона водонасыщенных образцов оказалось значительно ($\sim 1,5$ раза) выше — 147 кг/см² и 74000 кг/см².

Автор в основном правильно объяснил повышение прочности и модуля упругости бетона при водонасыщении восстановлением процесса твердения, усомнившись, однако, в том, что только это могло бы привести к столь значительному упрочнению бетона, предположив, что «...очевидно, есть и другие причины, которые привели к такому явлению, установление которых требует дальнейших исследований».

На наш взгляд, полученные результаты автора, имея в виду длительность обводнения, полностью могут быть объяснены вторичным твердением бетона.

Полученные автором кривые ползучести бетона при сжатии показали, что деформации образцов, насыщенных водой, 2,5–3 раза больше деформаций сухих образцов. Тем самым была доказана принятая автором гипотеза в части капиллярных явлений. Однако эти результаты были количественно искажены ворвавшимся в опыты автора процессом вторичного твердения бетона. Не будь этого процесса, деформации ползучести водонасыщенных образцов превосходили бы деформации сухих образцов не 2,5–3 раза, а значительно больше и можно было бы получить более правильные количественные показатели.

Методически было бы правильнее, если бы автор проводил свои опыты над бетоном не воздушного, а нормального влажного хранения, ибо в этом случае водонасыщение одной группы образцов не вызвало бы такого их упрочнения, что впрочем, нельзя было тогда предвидеть.

В описанных опытах автора весьма ценным для нас является то, что туфобетон четырехлетнего воздушного хранения проявил большую способность к вторичному твердению.

6. Следует облегчить требования технических условий по уходу за бетоном в летнее время

Способность летнего бетона упрочиться при обводнении должна быть учтена при производстве бетонных работ в сухое и жаркое время года. Дело в том, что при ведении бетонных работ в указанное время года, особенно в безводных и маловодных районах, удовлетворение технических требований [8, 9, 10] в отношении многодневного обеспечения влажных условий твердения бетона крайне затруднительно, а иногда и невозможно. Не может быть твердой уверенности в том, что применение в этих случаях пленочной защиты способно полностью обеспечить получение бетона с марочными показателями. Так, например, наши исследования [11], проведенные в природных условиях строительного производства в летнее время, показывают, что пленочная защита облицовки из бетона на литондной пемзе обеспечивает марочные показатели прочности и водонепроницаемости бетона на 86%. Здесь сказываются некоторое обезвоживание бетона грунтом основания, неизбежные трещины и дефекты в пленочном покрытии и т. д.

Учет последующего самоупрочнения бетона при его обводнении мог бы облегчить требования к уходу за бетоном в условиях сухого и жаркого климата. Особенно это касается таких случаев, как, например, бетонная облицовка каналов, бассейнов и т. д., защитить которую от высыхания, в силу развитой поверхности, затруднительно, но последующее обводнение которой происходит естественно и неизбежно с пуском воды. При этом совершенно безразлично, когда будет обводнен бетон.

Явление вторичного твердения бетона может быть использовано и для других, подходящих случаев практики.

Однако, в настоящее время мы не можем полностью согласиться с утверждением [5] о том, что влажный режим твердения бетона без ущерба для последнего может быть прерван в любое время и возобновлен в любое другое, более благоприятное время года, поскольку такое утверждение нуждается в проверке для наших материалов и наших условий и принятие его означало бы отказ от наших действующих технических условий в отношении одного из самых существенных вопросов бетонных работ—ухода за бетоном.

Истина заключается в том, что требования технических условий в отношении ухода за бетоном, в особенности в условиях сухого и жаркого климата, должны быть пересмотрены в сторону облегчения с учетом вторичного твердения летнего бетона при его обводнении, когда по характеру конструкции такое обводнение может иметь место. Это являлось бы существенной помощью строительному производству. Однако такому пересмотру должно предшествовать проведение дополнительной научно-исследовательской работы в нужных направлениях и разрешение многих вопросов.

Мы надеемся получить ответ на ряд поставленных вопросов по

ходу и завершении проводимых в настоящее время нами комплексных исследований поведения различных бетонов, вызревающих в условиях сухого и жаркого климата юга, и, в частности, вопроса вторичного твердения их при обводнении.

Институт строительных материалов и сооружений
АН Армянской ССР

Поступило 23 II 1957

Վ. Մ. ԿՈՒՅԱՎԵՐԴՅԱՆ

ԱՄՍՈՒԱՅԻՆ ԲԵՏՈՆԻ ԵՐԿՐՈՐԴԱՅԻՆ ՊՆԻԷՑՈՒՄԸ ՆՐԱ ՁՐԱՎՈՐՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա. Մ Վ Ի Ն Վ Ի Ն Մ

1953—1954 թվականներին ամառային բևտոնի հատկաթվաններն ուսումնասիրելիս, փորձնական որոշ արդյունքներ բացատրելու համար հեղինակը հարկադրված էր ենթադրելու, որ այդ բևտոնի շրափորման զեպքում տեղի է ունենում նրա երկրորդային պնդացում:

Այդ ենթադրությունն ստուգելու համար 1954 թ. փորձեր կատարվեցին: Նմուշներ պատրաստվեցին հետևյալ առասպի բևտոններից. բազալտի խճով և կվարցային սվազով ծանր բևտոնից, լիթոնիցային պեմզայով բևտոնից, երեմվանյան ախլի հրաբխային սուֆով բևտոնից և Անիի ու Պեմզաշենի պեմզայով բևտոնից: Բևտոնները պատրաստված էին Հայկական ՍՍԽ Արարատի ցեմենտի գործարանի թողարկած $R_9 = 425$ կգ/սմ² ակտիվացված ցեմենտով, ըստ որում ցեմենտի պարունակությունը 1 սմ³ բևտոնում կազմում էր 250 կգ: Բևտոններն ունեին պլաստիկ կոնտիտենցիա՝ կոնի 7 սմ նստվածքով: Պատրաստված նմուշները ներկայացնում էին պրիզմաներ՝ $10 \times 10 \times 40$ սմ և խորանարդներ՝ $10 \times 10 \times 10$ սմ չափերով:

Կադապարներով խոնավ պարամներում մեկ օր պահվելուց հետո նմուշները կադապարներից հանվեցին և նրանց մի մասը տեղափոխվեց կաշուն սեմիլ սենցոզ (օդի հարսերակալան խոնավությունը՝ 30—35%, ջերմաստիճանը՝ 28—32°C) հասուկ ամառային կամերա, իսկ մյուս մասը՝ նորմալ խոնավություն կամերա:

Ամառային կամերայում պահվող նմուշներից 3 պրիզմա և 3 խորանարդ (լարաքանչլար առասպի բևտոնից) 36—44 օրական հասակում 9 օր պահվեցին ջրի մեջ, աֆառնեան չորացվեցին և որոշվեցին նրանց ստաձղականությունը պինամիկ մոլոլը և սեղմման ամրությունը: Փորձարկվելուց առաջ նմուշները չորացնելու նպատակն էր՝ մերայնել նմուշի խոնավական միջակի սպղեղությունը նրա ստաձղականություն մոլոլի և ամրության վրա: Բևտոնի երկրորդային պնդացման էֆեկտը պարզելու նպատակով մի քանի հիշված նմուշներին դազրնիմաց փորձարկվեցին նաև կոնսրոլ նմուշներ՝ շրափորման շենթարկվածներից:

Փորձարկման արդյունքները ցույց տվին, որ ամառային բևտոնի շրափորման զեպքում իրոք տեղի է ունենում նրա երկրորդային պնդացում:

1 Ստորև ամառային է անվանվում չոր և տար կլիմայական (օդաչոր) պայմաններում ամրացող բևտոնը՝ նրա ներքին խոնավության ինտենսիվ գոլորշացման ասիլայությունը: Այդ պայմաններում հասունացած բևտոնն ունենում է ցած ամրություն [3]:

Նկատի ունենալով ստացած արդյունքների սկզբունքային կարևորությունը, հեղինակը ցանկացած պարզիկ՝ պահպանում է արդյոք ամստային բևտոնը ջրափորման դեպքում երկրորդային պնդացման իր բնույթնակաթյունը ժամանակի ընթացքում: Այդ նպատակով յարաբանչյուր տեսակի բևտոնից 3 պրոլիմա և 3 խորանարդ ամստային կամերայում 2 տարի պահելուց հետո 1-3 օր պահվեցին ջրում, ապա չորացվեցին և փորձարկվեցին: Այս դեպքում նույնպես փորձարկվեցին կոնարսկ նմաչներ:

Ստորե բերված աղյուսակում դետեղված են կատարված բոլոր փորձերի ընդհանուր արդյունքները (Տե՛ս նաև 1 և 2 աղյուսակները ռուսերեն տեքստում, որտեղ փորձերի արդյունքներն ավելի մանրամասն են բերված):

Աժոային բևտոնի երկրորդային պնդացումը նրա ջրափորման դեպքում

Բևտոնի տեսակը	Ջրափորումը՝ 30—41 սրական հասակում, ջրափորման տեղությունը՝ 0 օր		Ջրափորումը՝ 744—768 օրական հասակում, ջրափորման տեղությունը՝ 1 1/2 օր	
	առաձգականության դիստոմիկ մոդուլի աճը՝ տոկոսներով	սեղմման դիստոմիկ մոդուլի աճը՝ տոկոսներով	առաձգականության դիստոմիկ մոդուլի աճը՝ տոկոսներով	սեղմման դիստոմիկ մոդուլի աճը՝ տոկոսներով
Մանր բևտոն	46	39	47	77
Լիթիոպլակատ	36	29	37	59
Տուֆաբևտոն	31	27	36	39
Պեմպաբևտոն	14	20	0	0

Գննարկելով կատարված փորձերի արդյունքները, հանգում ենք հետևյալ եզրակացություններին.

1. Ամստային բևտոնի ջրափորման դեպքում տեղի է ունենում նրա երկրորդային պնդացում և ամրացում:
2. Ամստային ծանր բևտոնի ջրափորման դեպքում նրա երկրորդային պնդացումը տեղի է ունենում ավելի մեծ չափով, քան թե թեթև բևտոնների:
3. Ամստային բևտոնի ջրափորման դեպքում նրա երկրորդային պնդացման տեսակաթյունը ժամանակի ընթացքում չի իջնում, եթե բևտոնը պահվում է չոր պայմաններում:
4. Մակրոսկոպիկ թեթև բևտոնները, որոնք ձևավորվել և ամրացել են օդաչոր պայմաններում, այդ նույն պայմաններում կրկար (2 տարի) պահվելու դեպքում՝ առաձգականության և ամրության իրենց ցուցանիշները չեն իջեցնում: Ի տարբերություն թեթև բևտոնների՝ ամստային ծանր բևտոնը օդաչոր պայմաններում 2 տարի պահվելուց հետո նկատելիորեն իջեցնում է առաձգականության և ամրության իր ցուցանիշները:
5. Անհրաժեշտ է քննադատաբար վերանայել և շտկել պոնազան փորձարկումների մեթոդիկան այն բոլոր դեպքերում, երբ այդ մեթոդիկան կապված է ցեմենտի կամ բևտոնի նմաչների ջրափորման հետ և դա կարող է առաջ բերել նրանց ամրացում:

Այսպիս, օրինակ, պետք է վերանայել բևտոնի ստացակալունությունը ըստ ГОСТ 1800—49-ի փորձարկման մեթոդիկան այն իմաստով, որ ստուգման

ենթակա նմուշների հետ մեկտեղ ամեն անգամ շուրջ պիտի դնել նաև կոնարոյ նմուշները:

6. Պետք է թեթևացնել՝ ամռան ամիսներին բետոնի խնամելու տեխնիկական պայմանների պահանջները, եթե բետոնի կոնստրուկցիան, լուս իր մնույթի, հետագայում ենթակա է ջրափորման, ինչպես, օրինակ, ջրանցքների և ավազանների բետոնի երեսապատվածքը: Բայց այդ պահանջների թեթևացնելուն պետք է նախորդի լրացուցիչ գիտահետազոտական աշխատանք՝ ամառային բետոնի օսումնասիրությունից ազդու թվածը:

Ամառային բետոնի հետ կապված հարցերի կոմպլեքս օսումնասիրությունը հեղինակի կողմից շարունակվում է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Худавердян В. М. Морозостойкость бетона выдержанного в условиях сухого и жаркого климата. Отчеты АНС за 1953 год и 1954 гг.
2. Скрипачев Б. Г., Попов Н. А., Герливанов Н. А., Мууров Г. Г. Строительные материалы. Гос. изд. лит. по строит. матер. М., 1952, стр. 160.
3. Struct. Engt., 1954, 32, № 9, 235-243.
4. Карипетян К. С. Экспериментальное исследование ползучести легкого бетона на естественных пористых заполнителях (Кандидатская диссертация). Ереван, 1955.
5. Влияние высыхания бетона на процесс его твердения. Журн. «Бетон и железобетон», № 10, 1956.
6. Худавердян В. М. О некоторых свойствах «летнего» бетона. В «Трудах совещания по теории технологии бетонов». Изд. АН Армянской ССР. Ереван, 1956.
7. Матузов Т. Г. Влияние вакуумной обработки на качества бетона в условиях сухого и жаркого климата. Отчет АНС за 1953 год.
8. Строительные нормы и правила, ч. III, М., 1955.
9. Технические условия на производство и приемку строительных и монтажных работ. Раздел III. Бетонные и железобетонные работы, М., 1955.
10. Технические условия на производство бетонных работ по возведению гидротехнических сооружений в летнее время. ТУ-32-54. УКС МЭС СССР. Госэнергоиздат. М.—Л., 1955.
11. Худавердян В. М. Исследование эффективности этилолевой защиты бетона на литонидной пемзе в летнее время. В сборнике «Гидротехнический бетон на литонидной пемзе». (В печати).

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Д. И. СААКЯН

ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВЫБОРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕВЫХ АГРЕГАТОВ

Разработка научно-обоснованных методов оценки существующих машин и выбор их для данных условий эксплуатации имеет важное практическое значение как для с.-х. производства, так и для с.-х. машиностроения.

Созданием системы измерителей для оценки и выбора различных машин занимались многие исследователи. Однако до настоящего времени нет достаточно надежного и рационального метода, на основании которого было бы возможно придать ту или иную конструктивную систему данному агрегату.

Производственные данные каждой системы агрегатов характеризуются совокупностью признаков, имеющих неодинаковое значение, поэтому выбор той или иной конструктивной системы всегда оказывается в некоторой степени произвольным, так как нет единого показателя, который был бы пригоден для оценки машин в зависимости от условий их эксплуатации.

Для того, чтобы облегчить выбор машин необходимо иметь рациональный метод, позволяющий всю совокупность разнородных технических и экономических показателей привести к единой обобщенной характеристике, дающей возможность удобно сравнивать между собой различные конструктивные системы агрегатов.

1. Метод приведенной выработки

Для с.-х. работ существуют агротехнические оптимальные сроки, нарушение которых влечет за собой недоброкачественность работы или же выражается различными потерями урожая, поэтому при сравнении различных конструктивных систем следует принимать одинаковое общее время работы.

В этом случае основные эксплуатационные и экономические показатели агрегатов: производительность, затрата труда, расход топлива, затрата механической энергии, первичная стоимость и затраты средств на уход и ремонт могут быть различными.

Во всех случаях приемлема та конструктивная система агрегатов, которая дает максимальную выработку при наименьших значениях остальных параметров, потому что все затраты, связанные с экс-

платацией машин окупаются исключительно только выработанной продукцией этой машины. Следовательно, в основу всех параметров для сравнения различных систем может быть положена выработка.

При сопоставлении различных агрегатов оказывается, что по сравнимым показателям один из агрегатов имеет и преимуществ по сравнению с другим. Эффект, получаемый в результате этих преимуществ, мы выражаем через выработку. Иначе говоря, все эксплуатационные и экономические показатели работы агрегатов приводим к единому показателю с помощью приведенных выработок.

Если показатели первой и второй конструктивной системы обозначить u' и u'' , а выработку соответственно W'_i и W''_i , то уравнение приведенной выработки можно написать в следующем виде:

$$\frac{u'}{W'_i} = \frac{u''}{W'_i + W''_{пр}}. \quad (1)$$

Отношение $\frac{u'}{u''} = a = \text{const}$ и отношение $\frac{W'_i}{W'_i} = b = \text{const}$. Произведя соответствующие преобразования и подставив в уравнение (1) значения a и b , получим:

$$W''_{пр} = W'_i \left(\frac{b}{a} - 1 \right). \quad (2)$$

С помощью предлагаемого метода можно выявить преимущества одной конструктивной системы агрегата над другой, как по отдельным показателям, так и в целом.

Рассмотрим в отдельности показатели работы агрегатов существующих прицепных и навесных конструктивных систем.

1. *Анализ изменения величины приведенной выработки в зависимости от затрат труда.* Общие затраты труда при эксплуатации с.х. агрегата складываются из затрат на выполнение технологического процесса ($H_{тех}$), затрат на агрегатирование машин-орудий с трактором ($H_{агр}$), затрат на ремонт (H_p). При этом количество затраченного труда и квалификация занятых рабочих различны, поэтому каждый элемент затрат труда рассматривается отдельно. Например, при выполнении технологического процесса уравнение приведенной выработки можно составить в следующем виде:

$$\frac{H_{тех}''}{W'_i} = \frac{H_{тех}''}{W'_i + W''_{пр}}. \quad (3)$$

После преобразования и соответствующих обозначений, будем иметь:

$$W''_{пр. \text{тех}} = W'_i \left(\frac{b}{h_{тех}} - 1 \right), \quad (4)$$

где $H_{тех}''$, $H_{тех}''$ — затраты труда при работе прицепными и навесными агрегатами;

W_i^n ; W_i^m — выработка прицепного и навесного агрегата, и

$$b = \frac{W_i^n}{W_i^m}; \quad h_{\text{мес}} = \frac{H_{\text{мес}}^n}{H_{\text{мес}}^m}$$

Таким же способом определим остальные элементы затраты труда, после чего можно получить формулу суммарной приведенной выработки.

$$W_{\text{пр.а}}^n = W_i^n \cdot b \left(\frac{1}{h_{\text{мес}}} + \frac{1}{h_{\text{агр}}} + \frac{1}{h_{\text{д}}} - \frac{3}{b} \right), \quad (5)$$

где

$$h_{\text{агр}} = \frac{H_{\text{агр}}^n}{H_{\text{агр}}^m} \quad \text{и} \quad h_{\text{д}} = \frac{H_{\text{д}}^n}{H_{\text{д}}^m}$$

Как видно из формулы, приведенная выработка по затратам труда прямо пропорциональна выработке агрегата.

2. *Анализ изменения величины приведенной выработки в зависимости от расхода топлива.* В процессе эксплуатации агрегата топливо расходуется на выполнение технологического процесса ($Q_{\text{мес}}$), холостые ходы (Q_x), транспортировку агрегата ($Q_{\text{мр}}$), при остановках с работающим двигателем (Q_0) и во время ремонта (Q_p).

Суммарную приведенную выработку представим в следующем виде:

$$W_{\text{пр.г}}^n = W_i^n \cdot b \left(\frac{1}{q_{\text{мес}}} + \frac{1}{q_x} + \frac{1}{q_{\text{мр}}} + \frac{1}{q_0} + \frac{1}{q_p} - \frac{5}{b} \right), \quad (6)$$

где

$$q_{\text{мес}} = \frac{Q_{\text{мес}}^n}{Q_{\text{мес}}^m}; \quad q_x = \frac{Q_x^n}{Q_x^m}; \quad q_0 = \frac{Q_0^n}{Q_0^m}; \quad q_{\text{мр}} = \frac{Q_{\text{мр}}^n}{Q_{\text{мр}}^m} \quad \text{и} \quad q_p = \frac{Q_p^n}{Q_p^m}$$

Как видно из формулы (6) изменение приведенной выработки агрегата выражается также по линейному закону.

3. *Анализ изменения величины приведенной выработки в зависимости от металлоложения.* Если обозначить вес трактора (G_m), вес машины (G_n), выработку трактора на различных процессах за сезон (W_0) и выработку на данном процессе (W_i), то можно определить металлоложения с учетом доли металла от трактора, приходящейся на данный процесс, и простоев металла в машинах в следующем виде:

$$K_0 = \frac{G_m}{W_0} + \frac{G_n}{W_i} + G_n \left(\frac{W_0 - W_i}{W_0} \right) \frac{1}{W_i}, \quad (7)$$

после преобразования получим:

$$K_0 = \frac{G_m - G_n}{W_0} + \frac{2G_n}{W_i}. \quad (8)$$

В этом случае формула приведенной выработки представляется в следующем виде:

$$W_{\text{пр. г}}^n = \frac{b - g - \frac{AbW_i^n}{G_m}}{\frac{g}{W_i^n} + \frac{Ab}{G_m}}, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{G_m^n - G_u^n}{2W_0^n} - \frac{G_m^n - G_u^n}{2W_0^n} \text{ и } g = \frac{G_u^n}{G_m^n}.$$

Обозначив приведенную выработку через X , выработку агрегата через Y , получим:

$$X^2 + XY + A'X - B'Y = 0, \quad (10)$$

где

$$A' = \frac{G_m(b - g)}{bA} \text{ и } B' = \frac{gG_u}{bA}.$$

Как видно из формулы приведенная выработка по металлоложению находится в гиперболической зависимости от выработки агрегата.

4. Анализ изменения величины приведенной выработки в зависимости от первичной стоимости агрегата. Первичная стоимость агрегата (оптовая цена) включает стоимость трактора (A_m) и стоимость машины (A_u).

В этом случае следует учитывать долю стоимости трактора которая приходится на данный процесс.

Уравнение приведенной выработки можно написать в следующем виде:

$$\frac{A_m^n}{W_0^n} + \frac{A_u^n}{W_i^n} = \frac{A_m^n}{W_0^n} + \frac{A_u^n}{W_i^n + W_{\text{пр. а}}^n}. \quad (11)$$

После соответствующих преобразований, получим:

$$W_{\text{пр. а}}^n = \frac{b - a - \frac{KbW_i^n}{A_u}}{\frac{a}{W_i^n} + \frac{Kb}{A_u}}, \quad (12)$$

где

$$K = \frac{A_m^n}{W_0^n} - \frac{A_m^n}{W_0^n} \text{ и } a = \frac{A_u^n}{A_u^n}.$$

Сравнивая уравнения (9) и (12) можно видеть, что они совершенно идентичны. Разница заключается только в постоянных величинах.

5. Анализ изменения величины приведенной выработки в зависимости от затраты средств на уход и ремонт. Если средства необходимые для технического ухода и ремонта обозначить через (R_m), средства для технического ухода и ремонта за орудиями через (R_u), то уравнение приведенной выработки можно представить в следующем виде:

$$\frac{R_m^n}{W_0^n} + \frac{R_u^n}{W_l^n} = \frac{R_m^n}{W_0^n} + \frac{R_u^n}{W_l^n + W_{\text{оп.р}}^n} \quad (13)$$

В силу (13) приведенная выработка будет равна:

$$W_{\text{оп.р}}^n = W_l^n \left(\frac{r^n}{r^n + r} - 1 \right), \quad (14)$$

где

$$r^n = \frac{R_u^n}{W_l^n}; \quad r^u = \frac{R_u^u}{W_l^u} \quad \text{и} \quad r = \frac{R_m^n}{W_0^n} - \frac{R_m^u}{W_0^u}$$

Затраты средств на технический уход и ремонт так же как и величина приведенной выработки от затраты труда и расхода топлива, меняются по линейному закону.

Единым показателем для сравнения различных агрегатов должна быть выработанная продукция, т. к. выработанная продукция окупает все затраты и расходы, и является определяющим фактором при проведении работ в агротехнические сроки.

II. Применение метода приведенной выработки для выбора рациональной конструктивной системы культиваторов

На основании теоретических исследований проводились экспериментальные работы, которые в основном сводились к определению агротехнических показателей, производительности и расхода топлива.

В качестве экспериментальных агрегатов были взяты прицепной культиватор КП-4 и навесной КПН-4А с трактором „Беларусь“.

Сравнительные экспериментальные работы проводились на опытном участке Грузинской Государственной зональной МИС в соответствии с ГОСТ 3019-54. В программу экспериментальных работ по определению агротехнических показателей входило: определение равномерности глубины культивации, как в продольном направлении, так и в поперечном; определение ширины поворотной полосы. Определение глубины культивации имело целью: установление качества выполняемой работы и объема разрыхленной почвы, от которой зависит затрата механической энергии и, следовательно, расход топлива.

С целью выявления влияния отдельных эксплуатационных факторов на производительность агрегатов (ω) экспериментальные работы проводились для:

а) определения рабочей и теоретической скорости движения агрегатов (V_m и V_p) на рабочих и холостых ходах, и при транспортировке, а также определения коэффициента использования скорости движения (ε),

б) определения рабочей ширины (B_p) и коэффициента использования ширины захвата (β),

в) определения продолжительности и длины холостых ходов. Данные экспериментальных работ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Конструктивная система	Обозначение показателей						
	V_p	V_m	τ	B_p	B_K	ξ	μ
прицепная	4,77	5,1	0,93	3,91	1,0	0,98	1,70
навесная	4,90	5,2	0,91	3,97	1,0	0,99	1,79

Как видно из таблицы производительность навесного культиваторного агрегата больше, чем прицепного, несмотря на то, что ширина захвата культиваторов и трактора одна и та же.

Экспериментальные работы по определению расхода топлива проводились для: определения расхода топлива при выполнении рабочего процесса и определения расхода топлива при транспортировке по ровной полевой дороге, по полевой дороге с неровным рельефом и на подъеме.

Для определения расхода топлива в процессе эксперимента применялся специальный расходомер топлива, при помощи которого измерялся расход топлива на рабочих и холостых ходах в отдельности. Во избежание возможных погрешностей при одновременном включении приборов нами была составлена и применена электрическая схема синхронного включения приборов. Эта схема дала возможность при работе краном расходомера одновременно включать в действие остальные приборы.

В таблице 2 приведены данные по расходу топлива и скорости движения агрегата. Как следует из таблицы, навесная конструктивная система при выполнении технологического процесса расходует топлива меньше, чем агрегат с прицепным культиватором. При транспортировке получается обратная картина: агрегат прицепной конструктивной системы расходовал топлива меньше, несмотря на то, что вес прицепного культиватора в 2 раза больше веса культиватора навесного. Однако в общем балансе расход топлива был выше у прицепных агрегатов.

Имея экспериментальные данные по расходу топлива и производительности, возможно методом приведенной выработки оценить экспериментальные агрегаты для данных эксплуатационных условий. Например, агротехнический срок выполнения сплошной культивации 20 дней, для участка длиной $l = 1000$ м, шириной $C = 50$ м, причем трактор „Беларусь“ за с.-х. сезон будет работать 2000 часов. Определим приведенную выработку по каждому показателю в отдельности.

Затрату труда определим по формуле (5). Полученная величина $W_{пр}^* = 168$ га показывает, что навесной агрегат вследствие сокращения затрат труда мог бы дать дополнительно 168 га выработки по сравнению с прицепным агрегатом.

Таблица 2

Расход топлива трактором «Беларусь» на культивацию и транспортировку навесным и прицепным культиваторами.

Конструктивная система	Марка культиватора	Передача	Длина пройденного пути в м.	Продолжительность опыта в сек	Скорость движения агрегата км/час	Расход топлива за опыт в кг	Вид движения
1. Навесная	КПН-4А	II	180,0	132,3	4,90	0,220	Рабочий ход
2. Навесная	"	"	24,6	17,64	5,20	0,020	Холостой ход
3. Прицепная	КП-4	"	180,0	135,8	4,77	0,235	Рабочий ход
4. Прицепная	"	"	29,4	20,8	5,1	0,027	Холостой ход
5. Прицепная	"	V	360	98,3	13,18	0,121	Ровная полевая дорога
6. Навесная	КПН-1А	V	360	95,0	13,65	0,117	"
7. Прицепная	КП-4	IV	360	230,0	5,61	0,200	Полевая дорога с неспокойным рельефом
8. Навесная	КПН-4А	IV	360	167,0	7,76	0,177	"
9. Прицепная	КП-4	III	108	62,8	6,20	0,032	Подъем 18°
10. Навесная	КПН-4А	III	108	61,0	6,37	0,083	Тоже
11. Расход топлива на остановках при работающ. двигателе	—	—	—	396,3	—	0,114	На остановке

Приведенную выработку по расходу топлива определяем по формуле (6). За счет сэкономленного топлива навесная система могла бы дать дополнительно 92 га выработки.

Для получения приведенной выработки от веса металла данные по весу трактора и культиваторов берем из непосредственного взвешивания или из технических характеристик.

Приведенную выработку по металлоложению определяем по формуле (9). Благодаря меньшему весу навесного агрегата, можно получить дополнительную выработку, равную 185 га.

Данные по первичной стоимости агрегата следует взять из прейскуранта оптовых цен на промышленную продукцию с-х. машиностроения. Приведенную выработку по первичной стоимости агрегатов определяем по формуле (12). Вследствие меньшей первичной стоимости, навесная система обеспечивает дополнительную выработку, равную 32 га. Наконец, от сэкономленных средств на уход и ремонт приведенную выработку определяем по формуле (14). Благодаря сэкономленным средствам на техуход и ремонт навесная система могла бы дать дополнительную выработку, равную 43 га.

Таким образом, навесная система в данных эксплуатационных условиях по всем показателям имеет преимущество перед прицепной системой. Нам представляется, что приведенный пример в достаточной мере иллюстрирует сущность рекомендуемого метода.

Գ. Ն. ՍԱԱԿՅԱՆ

ԳՅՈՒՂԱՏՆՏԵՍԱԿԱՆ ԿԱՇՏԱՅԻՆ ԱԳՐԵԳԱՏՆԵՐԻ ԸՆՏՐՄԱՆ
ՏԵԽՆԻԿԱՆ-ԷՔՍՊԼՈՒԱՏԱՑԻՈՆ ԷԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Գյուղատնտեսական դաշտային աշխատանքներ կատարող մեքենաների կոնստրուկտիվ սխեմաների արտադրական տվյալները բնութագրվում են տարբեր նշանակություն ունեցող մեծություններով (մարդկային ուժի և վառելիքի ծախս, նախնական արժեք և այլն): Մինչ այժմ գոյություն չունի մեկ ընդհանուր չափանիշ, որի օգնությամբ հնարավոր լիներ յուրաքանչյուր կոնկրետ շահագործման պայմանների համար բնորոշ համապատասխան ագրեգատ: Ոչ ոք իսկ պատճառով մեքենաների կոնստրուկտիվ սխեմաների բնորոշում տեղի շահագործման պայմանների համար, որոշ չափով միշտ էլ ստացվում է կամայական:

Սույն հոգվածում առաջարկվում է արտադրանքի բերման նոր մեթոդ, որը հնարավորություն է տալիս տարբեր իմաստ ունեցող չափանիշները վեր ածել մի ընդհանուր չափանիշի՝ բերված արտադրանքի: Մեր կողմից կատարած տեսական հետազոտությունները, ինչպես նաև էքսպերիմենտալ աշխատանքները կցովի ու կախովի կուլտիվատորների բնորոշման գործում թույլ տվեցին անելու հետևյալ կիրառացությունները:

1. Առաջարկվող բերված արտադրանքի մեթոդը հանդիսանում է քննհանուր շափանիչ ագրեգատների կոնստրուկտիվ սխեմաները միմյանց հետ համեմատելիս: Այդ մեթոդը հնարավորութուն է տալիս ագրեգատների էքսպլուատացիոն և տնտեսական ցուցանիշները միավորելու մի քննհանուր ցուցանիշի սակ:

2. Արտադրանքի բերման մեթոդը կրճատում է էքսպերիմենտալ արտադրանքների ծախսը, այն հասցնելով լոկ արտադրողականության ու վստելիքի ծախսի որոշմանը և թե տվյալ ագրեգատը բավարարում է ագրոտեխնիկական պահանջներին, թէ ոչ:

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовк П. Ф. Измерители с.-х. машин, журнал Сельхозмашина, № 7, 1937.
2. Горячкин В. П. Теория жатвенных машин, Тобрание. Сочинений т. V, Сельхозгиз, 1940.
3. Горячкин М. И. Методика расчета и экономического анализа при проектировании сельхозмашин. Сельхозгиз, 1955.
4. Желиговский В. А. Некоторые задачи механизации и электрификации сельского хозяйства. Доклады ВАСХНИЛ, вып. 9, 1953.
5. Завалишин Ф. С. К вопросу проектирования и расчета механического оборудования для механизации полевых сельскохозяйственных процессов, Земл. механика, т. II, Сельхозгиз, 1954.
6. Кашутин В. Н. Об оценке сельскохозяйственных машин, журнал Сельхозмашина, № 6, 1950.
7. Свиричевский Б. С. Эксплуатация машинно-тракторного парка. Сельхозгиз, М., 1950.
8. Чудаков Д. А. Основы теории сельскохозяйственных навесных агрегатов. Машгиз, М., 1954.
9. Щучкин Н. В. Лемешные плуги и лущильники, Машгиз. 1952.

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

էջ

Հիդրավլիկա

2. Ս. Այվազյան. Տարբույթնառ նոսանքների հասկաթյունները ջրատարի պատերից տնջամափելու տեղամասերում 3

Հիդրոտեխնիկա

3. Ա. Ձիլինգարյան. Հեռնային զետեքը զերիփայլուն հիդրո-էլեկտրակայանների կառուցման աստիճանների բաժանելու հարցի շուրջը 27

Շինարարական տեխնիկա

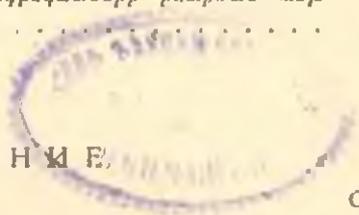
4. Ա. Տեր-Աղյուրի. Կարող եզրի կոնստիտի ձևի ազդեցությունը ուժերի վրա բարի կարման զեպքում 43

Քևտոնի տեխնոլոգիա

5. Ս. Խաղափերյան. Ամառային բնտոնի երկրորդային պնդացումը նրա վրափոխման զեպքում 51

Գիտական նյութեր

6. Ն. Ստեփանյան. Փյուզանտեխնիկայի զարգացման տղրեկատների բնտրման տեխնիկա-էլեպոլուտացիոն հիմնափորումը 63



С О Д Е Р Ж А Н И Е

Стр.

Гидравлика

2. М. Айвазян. Свойства турбулентных русловых потоков на участках отрывного течения 3

Гидротехника

3. А. Чилингарян. К вопросу разбивки горных водотоков на ступени каскада деривационных ГЭС 27

Строительная техника

4. А. Тер-Азарьев. Влияние формы контакта режущей кромки на условия при резании камня 43

Технология бетона

5. М. Худавердян. Вторичное твердение летнего бетона при его обводнении 51

Научные заметки

6. Н. Саакян. Технико-эксплуатационное обоснование выбора сельскохозяйственных полевых агрегатов 63