

0514177
ТРУДЫ МОСКОВСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА И ВСЕСОЮЗНОГО
ТРЕСТА ГИДРОЭЛЕКТРОПРОЕКТ

ВЫПУСК 3

А. С. ОФИЦЕРОВ

ПРОФИЛЬ ВОДОСЛИВНЫХ ПЛОТИН



ОНТИ ★ НКТП ★ СССР ★ 1935

2814177

ДЕП

ТРУДЫ МОСКОВСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА И ВСЕСОЮЗНОГО ТРЕСТА ГИДРОЭЛЕКТРОПРОЕКТ

ав. 22.08.35

ВЫПУСК III

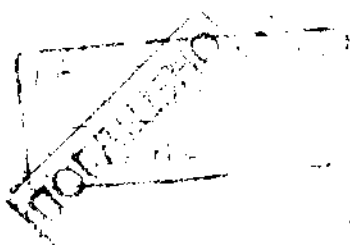
А. С. ОФИЦЕРОВ

ПРОФИЛЬ ВОДОСЛИВНЫХ ПЛОТИН

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
ПРОФ. А. Н. АХУТИНА

1938 К

1/303060



ОНТИ НКТП



ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА



1935



ЛЕНИНГРАД

ЭГ-15 (30)-5-3 (4)

Редактор инж. В. К. Перих

Техредактор А. Д. Чаров

15. 0 3. 2007

Сдано в производство 1 IX-34 г. Подписано к печати 7 III-35 г.
Уполномоченный Главлита № В-98 450. Энергоиздат № 650. Тираж 3 000.
Бумага 62 × 94 16,8⁰ п. л. Количество знаков в п. л. 58 400. Зак. тип. № 1779

Школа ФЗУ ОГИЗа им. Арт. Халатова. Москва, Колпачный, 13

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая работа заключает в себе все основное, касающееся гидравлики профиля водосливной плотины. Вопросы статической устойчивости водослива здесь не рассматриваются.

В первой части работы приведены все существующие способы построения профиля водосливной плотины, применяющиеся в гидравлике и гидротехнике. Эти способы здесь систематизированы и подвергнуты критической оценке.

Во второй части приведены экспериментальные данные, полученные автором в гидравлической лаборатории ЦАГИ, а затем в Гидроэнергетическом институте при исследовании на моделях до 30 различных водосливов.

В третьей части приведены профили некоторых существующих водосливных плотин и сделана оценка вакуумности их.

Наряду с обобщениями по вопросу о профиле настоящая работа выдвигает новые идеи в гидравлике: относительно ускорения j , по горизонтали при переливе потока через водослив, относительно непостоянства ke — центра тяжести на нормали, относительно „смещения вершины осевой параболы“, относительно преобразования потенциальной энергии в кинетическую в „свободной“ струе, относительно пульсации и др.

Настоящая работа выдвигает вопрос об использовании гидротехникой в ряде случаев вакуумных водосливных плотин, о чем автором было сделано сообщение в мае 1932 г. на совещании при гидроассоциации и о чем здесь ставится вопрос, — может быть, с чрезмерной осторожностью, — вторично и в более обоснованной форме.

Подбор материалов для этой работы производился с мая 1928 г. в стенах гидравлической лаборатории ЦАГИ. Первые материалы были получены из опытов автора под руководством проф. В. Т. Бовина с моделями Днепровской плотины (около 20 моделей). Эти материалы потом пополнились экспериментальными данными по четырем различным водосливам для проектировавшихся двух Бугских гидросиловых установок, затем материалами из опытов с плотинами Беломорско-Балтийского канала им. т. Сталина и др.

Испытания бугские и беломорские производились под руководством автора инженерами: П. Ф. Воробьевым, Е. М. Кнушевицкой, В. Г. Богоявленским, И. Гинзбургом и С. И. Лягиным.

Подбор литературных материалов производился с того же 1928 г. и в основном в 1932 г. В подборе материалов и при подсчетах оказал нам помощь инж. Е. И. Ягодин.

Выходу работы из печати способствовали б. Гидроэнергетический институт (ГЭИ), ныне Гидромашиностроительный (ВИГМ) научно-исследовательский, Всесоюзная гидроассоциация, а также и трест Гидроэлектропроект.

Ценные советы и указания, повлекшие расширение некоторых разделов работы для придания этим разделам большей убедительности, получены от проф. Н. М. Шапова, и особенно от проф. А. Н. Ахутина, производивших оценку работы

Проф. А. Н. Ахутин производил, кроме того, и окончательный просмотр — редактирование рукописи перед сдачей ее в печать.

Всем вышеуказанным мы выражаем здесь нашу признательность.

Москва, 8 февраля 1934 г.

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	Стр. 3
-----------------------	-----------

Часть I

Методы построения профиля водосливной плотины

1. Введение	7
2. Опыты Базена	9
3. Опыты Шимеши	12
4. Опыты Сабанеева	17
5. Опыты ГЭИ	—
6. Опыты Ребокка и Крамера	18
7. Данные Кригера	19
8. Построение Казанской	20
9. Построение Бовина	21
10. Построение Пузыревского	23
11. Построение Павлова	24
12. Новый способ определения координат нижнего профиля струи для условий: $k = \text{const}$ и $v_0 = \text{const}$	25
13. Построение Людина	25
14. Профиль Моррисона и Броди	27
15. Профиль американской консультации для простоя	—
16. Профиль Мюллера	—
17. Профиль Дейша	29
18. Сравнение единичных профилей	32
19. Первый и основной недостаток аналитических методов построения профиля	35
20. Степень уравнивания движения центра тяжести секундного расхода	42
21. Баланс энергии	45
22. Второй существенный недостаток современных методов построения про- филя водосливной плотины	50
23. Третий недостаток методов	60
24. Недостатки построения профиля по Кригеру. Коррективы в кригеровские таблицы координат профиля	—
25. Заключение	63

Часть II

Экспериментальные исследования профиля водосливной плотины

26. Общие данные	67
27. Испытание профилей: K , K_3 , K_4 и K_5	70
28. Испытание профиля Кригера в условиях плоской задачи	76

29. Испытание профиля Бовина с различными видами сопряжений напорной грани с гребнем в условиях плоской задачи	78
30. Испытание профиля БК или КБ	81
31. Испытание профиля американской консультации Днепростроя	82
32. Испытание профиля Сабанеева	83
33. Испытание профиля 1ЛЦ	84
34. Испытание профиля 2ЛЦ	85
35. Вид профиля, давление струи и коэффициент расхода	87
36. Коэффициент расхода практического водослива по различным формулам	93
37. Испытание профиля Ребокка	95
38. Испытание профиля плотины Крибштейн	—
39. Испытание водосливов в условиях пространственной задачи	101
40. Испытание водосливов при неполном открытии затвора	103
41. Пульсация давления струи	—
42. Шероховатость и неровности поверхности плотины, давление струи и коэффициент расхода	104
43. Испытание профиля плотины, не доведенной до нормальной отметки гребня	105
44. Масштаб модели и давление струи	106
45. Масштаб модели и коэффициент расхода	107
46. Заключение по части II	108

Часть III

Современные формы профиля водосливной плотины

47. Вакуумность современных плотин, связанная с конфигурацией их профиля	110
48. Вакуум на водосливных плотинах, происходящий от несовершенства методов производства работ	112
49. Бычки, пазы и вакуум. Аэрация струи	113
50. Заключение по части III	122
Список использованной литературы	124

ЧАСТЬ I

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ

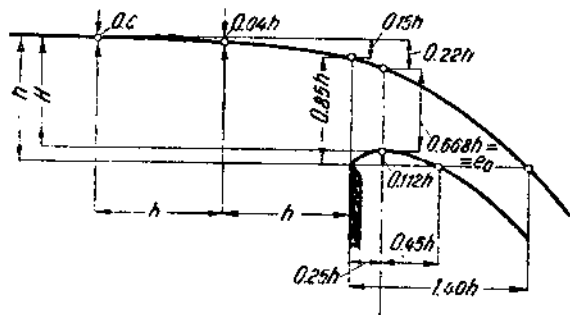
1. ВВЕДЕНИЕ

К гидравлическому профилю¹ водосливной плотины, как известно, предъявляются обычно требования, согласно которым этот профиль должен

быть безвакуумным, должен обладать максимальным коэффициентом расхода и минимумом сечения.

Иначе говоря, этот профиль водослива должен совпадать с профилем нижней поверхности струи, переливающейся через аэрированный базеновский водослив, разумея под последним водослив с острым горизонтальным гребнем, с вертикальной напорной гранью и располагающийся нормально к потоку. Давление под переливающейся струей равно атмосферному (фиг. 1).

При несовпадении профиля водосливной плотины с профилем нижней поверхности струи мы получаем или вакуумный профиль, если профиль водослива меньше по площади, чем нижний профиль струи, или профиль с пониженным коэффициентом расхода, вакуумный или безвакуумный в зависимости от формы кривой, если этот



Фиг. 1.

¹ Как здесь, так и в дальнейшем мы употребляем не совсем, может быть, удачное понятие „гидравлический профиль“. Это понятие пользовалось признанием и утверждением в гидравлической лаборатории ЦАГИ и в Гидроэнергетическом институте, как то. будет видно из приводимых ниже иллюстраций к статье, и оно означает, что профиль построен преимущественно на основе требований со стороны гидравлики.

профиль водослива имеет площадь, большую, чем нижний профиль струи. И, таким образом, только профиль водослива, выполненный по профилю нижней поверхности переливающейся струи через водослив Базена, будет вполне отвечать требованиям, предъявляемым к гидравлическому профилю водослива.

Как правило, гидравлический профиль отвечает условиям устойчивости и прочности плотины, и поэтому на более полный профиль, а стало быть, на профиль с пониженным коэффициентом расхода строителям приходится переходить лишь в довольно редких случаях и, главным образом, по геологическим условиям, при невысоком качестве стройматериалов для тела плотин, по ледовым и другим условиям, а также, что бывает наиболее часто, из желания перестраховаться от вакуума. Но даже и в этих случаях знание формы и минимального сечения профиля водослива по условиям безвакуумности и максимального коэффициента расхода представляет интерес, так как только при соблюдении определенного условия практический профиль может быть свободен от вакуума. Радиусы кривизны практического профиля должны быть определенным образом увязаны с таковыми для профиля гидравлического или для профиля нижней поверхности струи. Именно кривая

$$\rho = f(x) \text{ или } \rho = f(y),$$

где ρ — радиус кривизны, а x и y — координаты точки на профиле, для практического профиля должна быть выше таковой для профиля нижней поверхности струи, и разность

$$(\rho_{\text{плотины}} - \rho_{\text{стр}}) = F(x) = F(y)$$

должна представлять плавно возрастающую кривую.

Особо важное значение знанию формы безвакуумного профиля, обладающего минимумом сечения и одновременно максимумом коэффициента расхода, приобретает в том случае, когда все условия, кроме гидравлических, позволяют осуществить практический профиль со значительно меньшим, чем у него, сечением. Если профиль устойчивый и прочный может иметь сечение на 10% меньше, чем сечение профиля безвакуумного, то при объеме современных водосливных плотин в сотни тысяч куб. метров становится понятной и практическая ценность этого знания. Десятипроцентная разница в сечениях практически возможна.

При всех, однако, обстоятельствах и даже при 10% разнице в сечениях современная практика стремится, невзирая на перерасход строительных материалов, получить практический профиль безвакуумным, ибо:

- 1) вакуум перед гребнем водослива с практическим профилем может снизить коэффициент расхода;
- 2) вакуум за гребнем водослива создает добавочную опрокидывающую силу;
- 3) он может вызвать вибрацию сооружения, особенно опасную при наличии периодического прижимания и отрыва струи от кладки;
- 4) в зависимости от материала тела плотины он может вызвать более или менее сильную коррозию.

О губительном действии вакуума сообщает инж. Орам в описании аварии, на Вильсоновской плотине, Ребокс — в описании работы плотины Мюрталь,

проф. В. А. Васильев — в майском докладе (1932 г.) на совещании при Гидроассоциации и др.

Вакуум на сливной части водослива, вблизи гребня, может повысить коэффициент расхода. Это повышение коэффициента особо должно сказываться в профилях типа Ребокка — в профилях с сечением, меньшим, чем таковое у гидравлического безвакуумного профиля. Однако вследствие немоделируемости атмосферного давления ребокковские результаты опытов мы не имеем возможности в полной мере переносить не только на сооружения в натуре, но, вполне вероятно, и на модели более крупного, чем у Ребокка, масштаба. Все же можно быть уверенным, что профиль типа Ребокка, пройдя стадию лабораторных исследований, уже в ближайшее время получит право гражданства в случае прочных оснований под плотиной и одновременно при высоком качестве стройматериалов.

Однако без предварительных экспериментов (и на моделях и в натуре) впредь до получения качественных и количественных характеристик действия вакуума на всю плотину в целом и на ее материал, в ответственных сооружениях требование на безвакуумность не потеряет своего значения. Это требование нисколько, между прочим, не умалилось и после появления ребокковской формулы высоких коэффициентов.

В настоящее время гидротехника располагает следующими данными для определения формы рационального гидравлического профиля водосливной плотины:

2. Опыты Базена

Первым исследователем гидравлического профиля водосливной плотины, или, лучше сказать, первым исследователем профиля переливающейся через водослив струи был Базен. Произведенные им опыты в период с 1886 по 1895 г. до сих пор не превзойдены по полноте и совершенству постановки. Они служат основным исходным материалом для теоретического построения профиля, так как самим Базеном был подвергнут исследованию, к сожалению, весьма небольшой участок струи, именно в области $x = 0$ до $x = 0,7h$ (по фиг. 1).

В опытах Базена водослив с вертикальной гранью имел горизонтальную острую кромку и высоту от $w = 0,35$ до $w = 1,13$ м. Напор над острым гребнем изменялся от $h = 0,15$ до $h = 0,45$ м. Полость под ниспадающей струей вентилировалась, т. е. под струей имело место атмосферное давление.

Из опытов Базена могут быть сделаны следующие выводы:

1. В области $0,13 < \frac{h}{w} < 1,3$ координаты нижнего профиля струи (или верхнего профиля), уменьшенные в h раз, дают независимо от величины напора h одну и ту же кривую — профиль нижней поверхности струи при единичном напоре (или профиль верхней поверхности).

2. Эпюра скоростей и эпюра гидростатического давления в толще струи в суженном сечении ее (фиг. 2) в области $0,13 < \frac{h}{w} < 1,13$ могут быть также, через деление на напор h , приведены к единичному напору и после деления представляют: первая — эпюру скоростей, вторая — эпюру гидростатических давлений при единичном напоре.



Эти выводы могут быть иллюстрированы фиг. 1 и 2, представляющими обобщения Базена, и таблицей 1.

ТАБЛИЦА 1

Высота водослива с вертикальной стенкой $w = 1,13 \text{ м}$		Значения $\frac{y}{h}$ для значений $\frac{x}{h}$ от $-3,0$ до $+0,7$								
$\frac{x}{h}$	$h = 0,15 - 0,45 \text{ м} \dots$	-3,0	-1,0	0,0	0,95	0,10	0,15	0,20	0,25	
$\frac{y}{h}$	нижняя поверхн. струи	—	—	0,0	0,059	0,085	0,101	0,109	0,112	
$\frac{y}{h}$	верхняя поверхн. струи	0,996	0,963	0,851	—	0,826	—	0,795	—	
$\frac{e_0}{h}$	толщина струи	—	—	0,851	—	0,741	—	0,686	—	

Высота водослива с вертикальной стенкой $w = 1,13 \text{ м}$		Значения $\frac{y}{h}$ для значений $\frac{x}{h} = \text{от } -3,0 \text{ до } +0,7$								
$\frac{x}{h}$	$h = 0,15 \text{ до } 0,45 \text{ м} \dots$	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$\frac{y}{h}$	нижняя поверхн. струи	0,111	0,106	0,097	0,085	0,071	0,054	0,035	0,013	-0,009
$\frac{y}{h}$	верхняя поверхн. струи	0,762	—	0,724	—	0,680	—	0,627	—	0,560
$\frac{e_0}{h}$	толщина струи	0,651	—	0,627	—	0,609	—	0,592	—	0,569

Из фиг. 1 и 2 устанавливаем, что наибольший подъем нижней струйки за гребнем водослива выражается, по данным Базена, величиной $0,112 h$. Снижение профиля верхней струйки в суженном сечении струи происходит на величину $0,22 h$, и уже на расстоянии $-3 h$ от водослива это снижение становится весьма незначительным и выражается величиной $0,004 h$.

Между напором над гребнем острогребенчатого водослива и напором над гребнем практического водослива имеет место зависимость:

$$\frac{0,668 h + 0,22 h}{h} = \frac{H}{h}; H = 0,888 h, \text{ или } h = 1,125 H.$$

Толщина струи над гребнем водослива с практическим профилем или в суженной части струи за водосливом представляется величиной $e_0 = 0,668 h = 1,125 \cdot 0,668 h = 0,754 H$. Распределение скоростей по вертикали в суженном сечении струи не происходит в строгом соответствии с законом Торичелли ($v = \sqrt{2gh}$), и обнаруживается неравномерное распределение потерь ско-

рости по толщине струи. Эти потери максимальны примерно на 0,4 толщины струи от нижней ее поверхности. На верхней и нижней поверхностях струи потери скорости можно считать равными нулю. Эпюра скоростей имеет выпуклость, противоположную той, которая должна была получиться по расчету.

Как мы далее убедимся, авторы теоретических методов построения профиля водослива, ввиду того

что интервал $0,13 < \frac{h}{w} < 1,3$

достаточно широк, не ставят никаких ограничений в величине $\frac{h}{w}$ для соблюдения по-

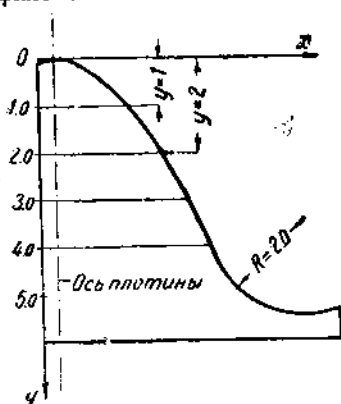
добия для действия единичного профиля. Для практических целей это допущение можно считать возможным;

строго же говоря, для каждого $\frac{h}{w}$ будет какой-то свой

единичный профиль, разница между которыми в интервале

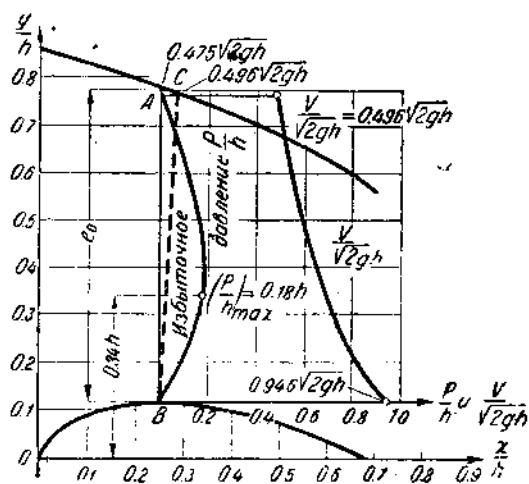
$0,13 < \frac{h}{w} < 1,3$ Базеном не обнаружена при его масштабе экспериментальной установки.

Задачей будущего является установление этих единичных профилей для различных $\frac{h}{w}$; практика же до получения результатов этих будущих исследований, не теряя ничего, может пользоваться единственным единичным профилем.



Фиг. 3.

Базену приводятся в таблице I (в конце статьи).



Фиг. 2.

Для удобства сравнения профилей условимся единичным профилем считать профиль для напора $H=1,0$ м над гребнем водослива с практическим профилем или для напора в 1,0 м над точкой наивысшего подъема нижней струйки за водосливом Базена.

Кроме того, для той же цели будем располагать координатные оси по отношению переливающейся струи следующим способом: положительное значение оси y направим к основанию водослива и ось совместим с напорной гранью; положительное значение оси x будем считать в сторону слива струи и ось расположим на отметке гребня практического водослива (фиг. 3). Для этого случая координаты профиля нижней поверхности струи по

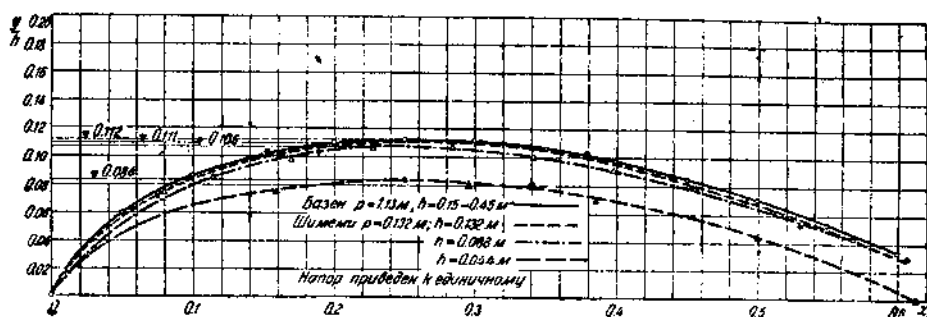
для нижнего профиля струи $y = \left(\frac{x-0,10}{1,55} \right)^2 + 0,062x - 0,186$ при $x > 0,50$

для верхнего профиля струи $y = \left(\frac{x-0,70}{1,42} \right)^2$ при $x > 1,40$

для профиля средней струи $y = \left(\frac{x-1,0}{2,155} \right)^{2,33} - 1,0$ при $x > 1,0$

* Для перехода на напор $H=1,0$ м вычисленные по уравнениям значения x и y следует умножить на $1,125h$, так как $H=1,125h$.

Кроме уравнений, Шимеми дает и координаты профиля верхней и ниж-



Фиг. 6.

ней поверхностей струи после пересчета результатов отдельных экспериментов на напор $h=1,0$ м. Эту таблицу координат мы здесь и приводим.

Таблицу Шимеми мы приводим здесь потому, что она являлась основной для получения координат нижнего профиля струи, приведенных в таблице I в конце текста (уравнение Шимеми является, как сказано, приближенным), и потому, что несколько позднее она используется нами для определения толщины струи.

По нанесении точек профиля согласно таблице 2 на чертеж оказалось: во-первых, что только при напорах $h=0,088$ м и $h=0,132$ м можно говорить об единичном профиле; здесь точки одного и другого профилей почти совпадают в верховой части и вполне совпадают с низовой, и, во-вторых, что данная таблица не представляет выравненных результатов измерений.

Поэтому для определения координат нижнего профиля струи пришлось использовать лишь данные для $h=0,088$ м и $h=0,132$ м, выравнив их по чертежу в 1:10 натуральной величины, считая $h=1,0$ м. В таблице I приводятся координаты нижнего профиля струи после выравнивания и пересчета их на $H=1,0$ м. Точки профиля при $h=0,444$ м значительно уклоняются от точек других двух профилей, что может быть иллюстрировано фиг. 6. Профиля при $h=0,088$ м и $h=0,132$ м, как видно из тех же кривых фиг. 6, дают довольно близкие, но не совпадающие с профилем по опытам Базена результаты. Основные параметры струи, переливающейся через водослив, по

ТАБЛИЦА 2
Координаты профиля струн для $h=1,0$ м по Шапину

Основной напор 0,04 м				Основной напор 0,088 м				Основной напор 0,132 м			
Верхний профиль		Нижний профиль		Верхний профиль		Нижний профиль		Верхний профиль		Нижний профиль	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
-4,903	-1,000	0,159	-0,075	-4,513	-1,000	0,080	-0,074	-3,000	-0,985	0,057	-0,061
-4,582	-1,000	0,205	-0,082	-3,820	-1,000	0,114	-0,085	-2,545	-0,985	0,076	-0,071
-4,465	-1,000	0,250	-0,084	-3,251	-0,998	0,170	-0,037	-1,409	-0,980	0,152	-0,104
-4,227	-1,000	0,295	-0,080	-2,582	-0,993	0,227	-0,106	-1,030	-0,967	0,189	-0,102
-4,025	-1,000	0,341	-0,082	-2,230	-0,975	0,284	-0,107	-0,652	-0,939	0,189	-0,102
-3,773	-1,000	0,386	-0,070	-1,545	-0,982	0,341	-0,100	-0,424	-0,939	0,227	-0,109
-3,548	-1,000	0,500	-0,045	-0,977	-0,965	0,398	-0,091	-0,343	-0,933	0,265	-0,106
-3,318	-0,998	0,614	0,000	-0,409	-0,920	0,455	-0,030	-0,045	-0,856	0,303	-0,110
-3,091	-0,999	0,841	0,125	0,159	-0,813	0,511	-0,063	0,030	-0,841	0,341	-0,106
-2,854	-0,998	1,068	0,296	0,273	-0,778	0,568	-0,045	0,105	-0,841	0,379	-0,102
-2,636	-0,998	1,295	0,511	0,386	-0,739	0,625	-0,019	0,182	-0,795	0,417	-0,091
-2,409	-0,995	1,523	1,773	0,500	-0,693	0,682	0,011	0,258	-0,788	0,455	-0,080
-2,182	-0,993	1,750	1,063	0,616	-0,619	0,739	0,040	0,333	-0,750	0,492	-0,071
-1,955	-0,991	1,977	1,420	0,739	-0,557	0,795	0,068	0,409	-0,720	0,530	-0,053
-1,727	-0,986	2,205	1,807	—	—	0,852	0,102	0,485	-0,685	0,568	-0,045
-1,500	-0,980	2,432	2,239	—	—	0,909	0,148	0,561	-0,685	0,607	-0,030
-1,273	-0,975	2,659	2,716	1,068	-0,307	0,966	0,188	0,561	-0,544	0,644	-0,011

-1,045	-0,966	2,886	3,232	1,182	-0,205	1,080	0,273	0,636	-0,614	0,682,	0,008
-0,820	-0,957	3,114	3,795	1,307	-0,097	1,194	0,392	0,712	-0,553	0,720	0,027
-0,591	—	3,340	4,477	1,409	0,028	1,307	0,494	0,788	-0,508	0,758	0,045
-0,384	—	3,568	5,080	1,528	0,182	1,420	0,602	0,864	-0,470	0,795	0,068
-0,136	-0,875	3,795	5,761	1,636	0,324	1,534	0,750	0,932	-0,424	0,833	0,083
0,091	-0,818	4,023	6,500	1,750	0,477	1,648	0,886	1,015	-0,356	0,871	0,114
0,318	-0,752	4,250	7,255	1,864	0,636	1,761	1,057	1,091	-0,295	0,909	0,152
0,545	-0,643	4,477	8,095	1,977	0,807	1,875	1,210	1,167	-0,212	0,947	0,192
0,773	-0,511	4,708	8,977	2,091	0,989	1,977	1,386	1,242	-0,143	1,023	0,235
0,999	-0,352	4,932	9,886	2,205	1,170	2,102	1,574	1,318	-0,061	1,038	0,288
1,227	-0,141	5,159	10,830	2,318	1,409	2,216	1,767	1,394	0,023,	1,166	0,356
1,455	-0,120	5,386	11,909	2,432	1,602	2,330	2,000	1,464	0,098	1,250	0,424
1,681	0,405	5,614	12,818	2,545	1,830	2,443	2,216	1,545	0,197	1,326	0,500
1,909	0,730	5,841	13,898	2,659	2,090	2,559	2,455	1,621	0,303	1,402	0,591
2,136	1,123	6,068	15,170	2,773	2,289	2,670	2,688	1,697	0,318	1,477	0,688
2,364	1,534	6,295	16,250	2,886	2,489	2,784	2,932	1,773	0,530	1,553	0,773
2,591	2,014	6,593	17,420	3,000	2,652	2,898	3,182	1,841	0,621	1,629	0,864
2,818	2,505	—	—	3,114	3,136	3,011	3,489	1,924	0,705	1,705	0,955
3,045	2,505	—	—	3,288	3,682	3,125	3,761	2,000	0,841	1,780	1,058
3,273	3,648	—	—	3,341	3,795	3,239	4,091	2,076	0,962	1,856	1,186

данным Шимеми при $h=0,132$ в общем довольно близки к таковым по Базену и к долженствующим быть по Буссинеску.

Нижеследующая таблица 3 может иллюстрировать это.

ТАБЛИЦА 3

Параметры	По Шимеми	По Базену	По Буссинеску
Понижение верхней поверхности струи над острым гребнем водослива	0,15 h	0,15 h	—
Толщина струи в суженном сечении	0,658 h	0,668 h	0,667 h
Высота подъема нижней струи над гребнем водослива	0,111 h	0,112 h	0,111 h
Понижение верхней поверхности струи в суженном сечении	0,230 h	0,22 h	0,222 h
Расстояние от гребня водослива до суженного сечения	0,25 h	0,25 h	—
Положение центра тяжести секундного расхода в суженном сечении	0,43 e_0	0,444 e_0	—
Ордината точки с максимальным давлением в толще струи в суженном сечении	$\approx 0,35 h$	0,34 h	0,375 h
Отношение скоростей на верхней и нижней поверхностях струи в суженном сечении (горизонтально-составляющие)	0,51	0,5 h	0,47
Максимальное давление в толще струи в суженном сечении	$0,18 h < P < 0,19 h$	0,18 h	0,19 h

Выше мы указали, что уравнения Шимеми для нижнего и верхнего профилей струи являются приближенными. Они не согласуются с экспериментальными данными и теоретическими предпосылками всех исследователей и в том числе с экспериментальными данными самого Шимеми. В этом легко убедиться, произведя построения профилей по таблицам Шимеми и по его уравнениям, а также и из сопоставления данных нижеследующих подсчетов с материалами, приводимыми несколько позднее в настоящей работе. Эти подсчеты, следует сказать, доказательны и сами по себе.

Толщина струи e_x , измеряемая по вертикали, может быть, согласно уравнениям Шимеми, определена следующим образом:

$$e_x = \text{Униж. проф} - \text{Уверх. проф} = \left(\frac{x-0,10}{1,55} \right)^2 + 0,062x - 0,186 - \left(\frac{x-0,70}{1,42} \right)^2 = \left(\frac{x-0,10}{1,55} + \frac{x-0,70}{1,42} \right) \left(\frac{x-0,10}{1,55} - \frac{x-0,70}{1,42} \right) + 0,062x - 0,186.$$

Окончательно $e_x = -0,08x^2 + 0,674x - 0,425$.

Как уравнение производное, оно действительно по условиям Шимеми, при $x > 1,4$. В таком случае:

$$\begin{array}{ll} \text{при } x=1,5 & e_x=0,456, \\ \text{„ } x=2,0 & e_x=0,673, \\ \text{„ } x=3,0 & e_x=0,877. \end{array}$$

Максимальной величины e_x достигает, когда $\frac{de_x}{dx} = 0$, именно когда $x = 4,2$; тогда $e_x \approx 1,000$. Далее e_x убывает, становясь равной нулю при $x = 7,74$, а затем при $x > 7,74$ — отрицательной.

Безусловно, e_x не может претерпевать указанных изменений. Вместо роста величины e_x в интервале $1,4 < x < 4,2$ мы можем наблюдать лишь постоянство величины e_x . При $x > 4,2$ уравнения для e_x и для верхнего и нижнего профилей теряют смысл.

В силу сказанного можно утверждать, что уравнение для e_x не отображает наблюдающуюся в действительности форму струи, что уравнения Шимми для верхнего и нижнего профилей струи не могут дать совпадения с действительностью.

4. Опыты Сабанеева

В отличие от постановки опытов Базеном и Шимми, Сабанеев при экспериментировании острогребенчатого водослива подводил под переливающуюся струю некоторое, весьма небольшое избыточное давление. Таким образом он, очевидно, имел в виду получить профиль тела плотины не с нулевым, а с некоторым положительным давлением струи на кладку. Мысль эта совершенно правильная, так как следует учитывать, что всякое, хотя бы самое небольшое, увеличение радиусов кривизны профиля кладки по сравнению с нижним профилем переливающейся струи через базеновский водослив непременно вызовет возрастание горизонтальной составляющей средней скорости струи и на последующем участке профиля вакуума. Значительно сглаживается влияние "игры" в радиусах кривизны, которую, надо сказать, на сооружении в натуре избежать невозможно, на профиле, рассчитанном на некоторое избыточное давление струи над атмосферным. Подробнее об этом сообщим позднее.

По полученным из опытов с базеновским водосливом координатам профиля нижней поверхности струи Сабанеев изготовлял затем модель водослива практической формы и подвергал ее исследованию в отношении давления струи и коэффициента расхода. Высота водослива в этих опытах равнялась приблизительно 0,35 м и напоры доходили приблизительно до 0,1 м.

По данным испытаний модели водослива по Сабанееву в ГЭИ в два раза более крупном масштабе коэффициент расхода оказался для него равным при расчетном напоре $m = 0,50$ и профиль оказался вакуумным. Координаты его мы приводим в таблице I.

Опыты Сабанеева проведены по поручению Днепровского строительства.

5. Опыты ГЭИ

По заданию того же строительства исследование моделей водосливов производил в 1928 г. б. гидравлический отдел Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ), теперь Гидроэнергетический институт (ГЭИ). В его опытах модели водосливов имели высоту 0,64 м и напоры H до 0,18 м. Путем последовательных улучшений из шестнадцати испытан-

ных получены два безвакуумных профиля, координаты меньшего из коих приводятся в таблице I. Этот профиль под маркой 2ЛЦ принят и осуществлен Днепростроем. Его коэффициент расхода в условиях плоской задачи $m = 0,50$ при расчетном напоре.

Различными лабораториями и исследователями было произведено значительное количество опытов с водосливами практических форм, но, поскольку тело водослива всегда в большей или меньшей степени деформирует свободный профиль базеновской струи, эти исследования не могут дать ясного представления о профиле безвакуумном с минимумом сечения и более здесь рассматриваться не будут. Несколько придется здесь остановиться лишь на опытах Ребокка и Крамера.

6. Опыты Ребокка и Крамера

Целью работ последних было: установить связь между формой оголовка (верховой части водослива) и коэффициентом расхода при использовании положительного действия вакуума.

По Ребокку для водослива с вертикальной верховой гранью и низовой с откосом 3:2 между коэффициентом расхода m и радиусом округления оголовка r имеется следующая зависимость:

$$\mu = 0,312 + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(5 - \frac{H}{r} \right)^2} + 0,09 \frac{H}{W}$$

в пределах пока $W > r > 0,02$ м и

$$H < r \left(6 - \frac{20}{W+3} \frac{r}{r} \right),$$

где W — высота водослива;

H — напор над гребнем;

$\frac{2}{3} \mu = m$.

При очертании оголовка по эллипсу с осями $3a$ и $2b$, причем ось $3a$ параллельна низовому откосу и $2b$ — перпендикулярна ему, коэффициент расхода можно вычислить по той же формуле, полагая

$$r = b \left(\frac{4,57}{2\alpha + 1} + \frac{a}{20} - 0,573 \right),$$

где $\alpha = \frac{a}{b}$ при условии, если $0,5 < \alpha < 6,0$.

При $H > r \left(b - \frac{20}{W+3} \frac{r}{r} \right)$ струя отливает от низового откоса, и зависимость между μ и r нарушается.

Почти тождественную ребокковской дает зависимость между μ и r Крамер. По мнению и того и другого исследователей, пользуясь их формой водослива, наряду с большой экономией в кладке имеется возможность получить для водослива коэффициент расхода $m = 0,60$ и даже выше.

Выше мы уже указывали, что вследствие немоделируемости атмосферного давления мало реальны надежды на получение столь высоких коэф-

фициентов, но все же вследствие подсасывающего действия вакуума имеется возможность несколько повысить этот коэффициент. Подсасывание струи в сильнейшей мере зависит от разности давлений над и под струей, от скорости подхода воды к плотине и от напора над гребнем, т. е. от факторов, первый из которых (разность давлений) не поддается моделированию. Отсюда вместе с тем должно стать понятным, что манипуляции с радиусами округления оголовка при соблюдении безвакуумности профиля, как то делает ряд авторов с целью повышения коэффициента расхода, обречены на полную неудачу. Только у базеновского очертания оголовка, при безвакуумности, этот коэффициент расхода должен быть наибольшим.

7. Данные Кригера

Для построения профиля струи и профиля тела плотины Кригер исходит из собственных экспериментальных данных, из опытных данных Базена и из некоторых теоретических соображений. В приводимой им таблице координат профиля струи участок до $x=1,5$, чему соответствует на верхнем профиле $y \approx 0,20$, и на нижнем профиле струи ордината $y \approx 0,60$ представляет участок струи, фиксированный экспериментами; участок при $x > 1,5$ является теоретическим. Профиль кладки построен интуитивно; он более полон, чем профиль нижней поверхности струи для получения положительного давления струи на кладку. Теоретически профиль обоснован следующим образом: положив, что от некоторого вертикального сечения струи перелив струи становится свободным, т. е. под воздействием только силы тяжести и горизонтальной составляющей скорости струи, сохраняющейся постоянной для всех нижележащих сечений, можно написать для движения центра тяжести струи уравнения:

$$x' = v_h t \text{ и } y' = \frac{gt^2}{2},$$

каковые, по исключении параметра t , дают:

$$x'^2 = \frac{2v_h^2}{g} y';$$

положив далее, что центр тяжести секундного расхода совпадает с максимумом гидростатического давления в толще струн по фиг. 2 Базена, т. е. на $1/3$ толщины струи от нижнего профиля ее, устанавливаем вертикальное сечение, ниже которого горизонтально составляющая средней скорости v_h остается постоянной. Последнее, так же как и величина скорости и расхода, по сообщению Кригера, установлены им опытным путем, именно:

для $H=1$ футу (по фиг. 7): $a = +0,261$ ф,

$$b = -0,063 \text{ ф},$$

$$v_h = 6,63 \text{ ф/сек},$$

$$q = 3,90 \text{ ф}^3/\text{сек};$$

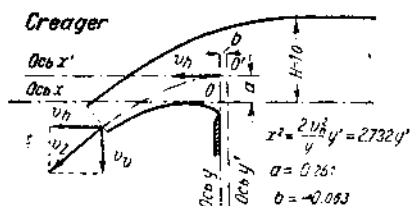
для $H=1,0$ м получаем: $a = +0,261$ м,

$$b = -0,063 \text{ м},$$

$$\begin{aligned}
 v_h &= 6,63 \cdot 0,3048 \cdot \sqrt{3,281} = 3,66 \text{ м/сек}, \\
 g &= 32,2 \text{ ф/сек}^2 = 9,81 \text{ м/сек}^2, \\
 Q &= 2,15 \text{ м}^3/\text{сек}, \\
 x'^2 &= 2,732 y',
 \end{aligned}$$

как и для размеров в футах.

Построив теперь осевую параболу или параболу движения центра тяжести секундного расхода (по уравнению: $x'^2 = 2,732y'$), определяем для ряда ее точек толщину струи согласно уравнению:



Фиг. 7.

$$e = \frac{Q}{v_{abc}} = \frac{Q}{\sqrt{v_h^2 + 2gy'}} = \frac{Q}{\sqrt{A + By'}},$$

и, откладывая в соответствующих точках параболы по нормальям $\frac{1}{3}$ толщины струи вниз, мы получаем точки нижнего профиля струи, а $\frac{2}{3}$ толщины струи вверх — точки верхнего профиля струи. Координаты верхнего и нижнего профилей струи Кригером определялись гра-

фически. В таблице II (в конце статьи) приводим координаты нижнего профиля струи по данным Кригера и там же приводим координаты Кригера, расширенные и исправленные нами согласно пояснениям, приведенным в конце 1 части работы.

8. Построение Казанской

Казанская строит профиль водослива на основании экспериментальных данных Базена и на основании предположений, что:

1) Движение струи становится свободным от сечения с абсциссой $x = 0,2h$ по фиг. 2 или что это движение может быть подчинено уравнениям в параметрической форме:

$x = v_0 t$ и $y = \frac{gt^2}{2}$, где v_0 — средняя горизонтально составляющая скорости в вертикальном сечении, соответствующем положению вершины осевой параболы. (Кригер, как упоминалось ранее, движение струи считает свободным от сечения $x = -0,063H$ по фиг. 7.)

2) Профиль верхней и профиль нижней поверхностей струи вполне определенным образом связаны с профилем осевой параболы (траектория движения центра тяжести), и именно расстояние по нормали от точки осевой параболы до точки профиля верхней или нижней поверхности струи определяется постоянной дробной частью от толщины струи $e = \frac{Q}{v_{abc}}$, измеряемой

в том же сечении (то же допускает и Кригер).

Определив, как это делает Казанская, площадь эпюры скоростей в суженном сечении струи по фиг. 2, получаем величину секундного расхода для водослива Базена $q = 1,9 \text{ м}^3/\text{сек}$, а затем и коэффициент расхода $m = 0,429$. Разделив теперь на горизонтальные полоски площадь эпюры скоростей по фиг. 2 и определив моменты этих полосок относительно оси x -ов, находим положение струйки, обладающей средней скоростью, или положение цен-

тра тяжести секундного расхода. По Казанской центр тяжести располагается на 0,444 толщины струи в суженном сечении над точкой наивысшего подъема нижней струйки.

Полагая, что положение центра тяжести не изменяется в сечении от $x = 0,2h$ (по фиг. 2) и во всех нижерасположенных сечениях, находим координаты его в сечениях $0,2h$; $0,3h$; $0,4h$; $0,5h$; $0,6h$; и $0,7h$. Для упрощения, как это делает Казанская, допускаем, что положение центра тяжести будет установлено довольно точно, если мы будем вместо нормальных брать вертикальные сечения струи и в этих сечениях будем откладывать от нижней поверхности 0,444 соответствующей толщины струи. От второго по седьмое сечение, согласно фиг. 2, координаты центра тяжести будут тогда следующие:

$$\begin{array}{cccccc} x = 0,200 & 0,300 & 0,400 & 0,500 & 0,600 & 0,700, \\ y = 0,414 & 0,400 & 0,378 & 0,341 & 0,298 & 0,244. \end{array}$$

Уравнение движения центра тяжести в общем виде может быть написано:

$$y = n + mx + kx^2.$$

По подстановке в него координат центра тяжести и по решению уравнений относительно неизвестных n , m и k находим:

$$y = 0,414 + 0,099x - 0,488x^2.$$

Вершина параболы имеет координаты из уравнения:

$$\frac{dy}{dx} = 0,099 - 2 \cdot 0,488x = 0.$$

Эти координаты: $x = 0,1044$ и $y = 0,419$. Тогда уравнение осевой параболы может быть написано также и в виде:

$$(x - 0,1014)^2 = 2,049(y - 0,419).$$

Построив эту осевую параболу известным уже способом, определяем координаты точек верхнего и нижнего профилей струи.

Эти координаты Казанская определила графическим путем. Для нижнего профиля, после пересчета на $H = 1,0$ м, они приводятся в таблице I.

Входную часть профиля Казанская берет по Базену.

9. Построение Бовина

Бовин считает движение струи свободным от сужения сечения струи по фиг. 2 и для центра тяжести дает уравнение движения в виде:

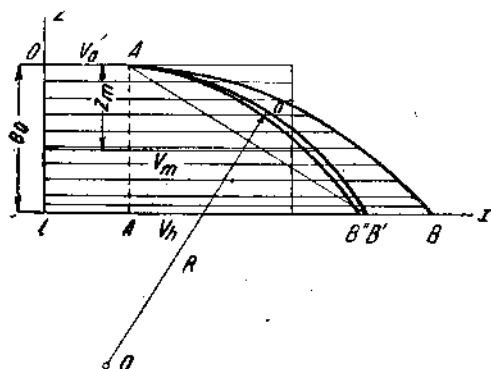
$$x^2 = \frac{2v_0^2}{g} y = py.$$

Величина средней горизонтально составляющей скорости в суженном сечении струи v_0 и положение центра тяжести секундного расхода в том же сечении Бовиним определяются из эпюры скоростей, которая строится, исходя из следующих соображений: горизонтальная составляющая скорости в суженном

сечении струи при глубине погружения под поверхность z (по фиг. 8) может быть определена из уравнения:

$$v_z = v_{\text{нов}} + \mu \sqrt{2gz},$$

где $v_{\text{нов}}$ — горизонтальная составляющая скорости поверхностной струйки и μ — коэффициент расхода. Скорость $v_{\text{нов}}$ определяется из условий, что если бы частица жидкости на поверхности струи прошла расстояние $0,23 h$ (по Бовину) при свободном падении (фиг. 1), ее вертикальная составляющая скорости должна была бы иметь величину $v_{\text{верт}} = \sqrt{2g \cdot 0,23h} = 0,48 \sqrt{2gh}$, а так как эта частица при падении сохраняет и скорость подхода воды к водосливу, то ее абсолютная скорость $v_{\text{абс}} = \sqrt{v_{\text{подх}}^2 + v_{\text{верт}}^2}$ (фиг. 9).



Фиг. 8.

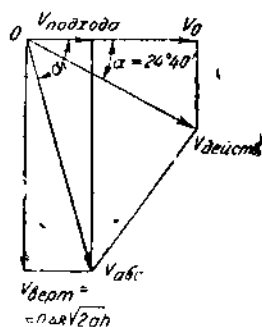
Из экспериментальных данных Базена (фиг. 1) эта скорость $v_{\text{абс}}$ составляет угол с горизонтом $\alpha = 24^\circ 40'$ вместо полученного нами угла $\alpha_1 = \arctan \frac{v_{\text{верт}}}{v_{\text{подх}}} = 84^\circ 40'$. Стало

быть, поверхностная струйка под воздействием нижележащих струек отклоняется на угол $(\alpha_1 - \alpha) = 60^\circ$ (по Бовину). В таком случае действительная скорость поверхностной струйки $v_{\text{действ}} = v_{\text{абс}} \cdot \cos(\alpha - \alpha_1)$, а ее горизонтально составляющая $v_{\text{нов}}$ или v_0 по обозначению Бовина,

будет равна $v_0 = v_{\text{нов}} = v_{\text{действ}} \cdot \cos \alpha_1$ (фиг. 9). Прибавляя к вектору v_0 , сохраняющему свою величину на любой глубине, векторы скорости $\sqrt{2gz}$, зависящие от глубины погружения z частицы жидкости под поверхность воды суженного сечения, получаем кривую AB концов векторов горизонтально составляющих скорости по толще струи (фиг. 8). Величина результирующего вектора будет при этом равна $v_z' = v_0 + \sqrt{2gz}$. Задаввшись коэффициентом расхода μ , вводим в величины векторов v_z' поправки на коэффициент. Величина поправки для вектора v_z' будет равна:

$$\begin{aligned} v_z' - v_z &= v_0 + \sqrt{2gz} - v_0 - \mu \sqrt{2gz} = \\ &= (1 - \mu) \sqrt{2gz}. \end{aligned}$$

Введя эту поправку на коэффициент, мы получаем на фиг. 8 кривую AB' . Определив по контуру AB' величину секундного расхода, сравниваем его с тем, которым мы задались по коэффициенту расхода и, если окажется расхождение, вводим поправку на скорости $\beta = \frac{Q_{\text{действ}}}{Q_{\text{теор}}}$, где $Q_{\text{теор}}$ равняется площади $e_0 OAB'$ по фиг. 8.



Фиг. 9.

По введении поправки β получаем окончательную кривую AB'' концов векторов горизонтальных составляющих скорости в суженном сечении.

Очевидно, когда мы задались коэффициентом расхода, мы тем самым, при известной величине e_0 (по фиг. 2), можем вычислить величину расхода Q и величину средней горизонтальной составляющей скорости v_0 .

Из эпюры скоростей нам надлежит в таком случае установить лишь центр тяжести секундного расхода. Он определяется из моментов элементарных полосок относительно оси x -ов по фиг. 8. По Бовину он располагается на $0,43 e_0$ от нижней поверхности струи по фиг. 2 или по фиг. 8.

Зная теперь положение вершины осевой параболы и параметр $p = \frac{2v_0^2}{g}$ в уравнении параболы, строим ее и, откладывая $0,43$ толщины струи по нормали вниз, получаем нижний профиль струи, а $0,57$ толщины струи по нормали в соответствующей точке вверх — профиль верхней поверхности струи. Толщина струи определяется для любой точки из уравнения:

$$e = \frac{Q}{\sqrt{v_0^2 + 2gy}},$$

где v_0 — средняя горизонтальная составляющая скорости в суженном сечении струи.

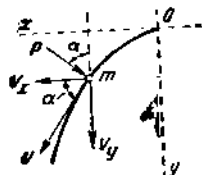
В таблице I мы приводим координаты профиля для $H=1,0$ м, предлагаемого Бовиным Днепрострою, и координаты профиля при условии $v_0 = 3,17$ м/сек, при $Q=2,38$ м³/сек, $m=0,535$ и $p=2,044$.

10. Построение Пузыревского

Пузыревский строит профиль водосливной плотины с учетом силы прижима струи к кладке. Уравнение движения центра тяжести секундного расхода в этом случае получает в параметрической форме следующий вид:

$$\frac{dv_y}{dt} = g - p \cdot \cos \alpha;$$

$$\frac{dv_x}{dt} = p \cdot \sin \alpha.$$



Фиг. 10.

Эти уравнения становятся понятными из рассмотрения фиг. 10. На ней P обозначает ускорение от силы прижима струи к кладке.

По исключении из уравнений времени t получаем:

$$\frac{dv_y}{dv_x} = \frac{g}{p \cdot \sin \alpha} - \frac{1}{\tan \alpha},$$

или, заменяя dv_y равной величиной $\tan \alpha \cdot dv_x + v_x \cdot \frac{d\alpha}{C_0^2 d}$, разделяя переменные,

$$\text{в виде: } \frac{dv_x}{v_x} = \frac{\sin \alpha \cdot d\alpha}{\frac{g}{p} \cos^2 \alpha - \cos \alpha}.$$

Последнее может быть решено при $p = \text{const}$ и при p — переменном

При переменном p уравнение движения центра тяжести получает вид:

$$x = \int \frac{dy}{\left(\frac{2gy}{v_0^2} + 1\right)^{\frac{1}{1+\beta}} - 1},$$

где β — величина, характеризующая силу прижима. При $\beta = 0$:

$$x^2 = \frac{2v_0^2}{g} y = py.$$

Для $\beta = 0,1$ Казанская, пользуясь уравнением Пузыревского, построила профиль осевой параболы и, полагая, что он располагается на 0,45 толщины струи от нижней ее поверхности, графически определила координаты профиля нижней поверхности струи, а затем и координаты верхнего профиля. По пересчете на напор $H = 1,0$ м эти координаты приводятся в таблице I. Входная часть профиля — по Базену.

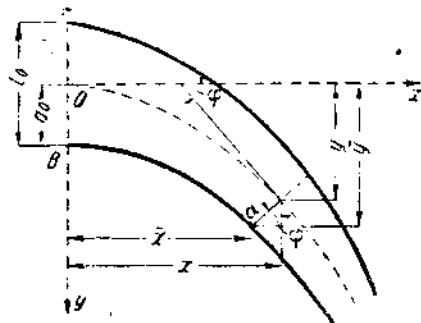
Идея построения профиля с учетом силы прижима была высказана несколько ранее Кохом и Карстаньеном.

По Пузыревскому, так же как и по Бовину, Казанской и Кригеру, средняя горизонтально составляющая скорости струи v_0 суть постоянная величина, и расстояние по нормали от осевой параболы до профиля верхней или нижней поверхности струи составляет постоянную дробную часть от толщины струи $e_0 = \frac{Q}{v_{abc}}$.

Движение струи по Пузыревскому свободно от суженного сечения ее.

11. Построение Павлова

Павлов всецело разделяет приведенные выше взгляды. Положение центра тяжести секундного расхода он считает на половине толщины струи и уравнение осевой параболы $x^2 = py$ при вершине параболы в суженном сечении струи.



Фиг. 11.

В отличие от способа определения координат нижнего и верхнего профилей струи графическим путем, которым, надо сказать, пользовались все авторы, Павлов предлагает аналитический способ. Если, согласно фиг. 11, через e со значками 1, 2, 3 . . . обозначить толщину струи, измеряемую по нормали к осевой параболе, через v с теми же значками — средние абсолютные скорости, то будем иметь:

$$Q = e_1 v_1 = e_2 v_2 = \dots = e_n v_n,$$

где

$$v_1 \perp e_1; v_2 \perp e_2; \dots; v_n \perp e_n.$$

Если теперь через a со значками: 1, 2, 3 . . . обозначить расстояние, измеряемое по нормали от осевой параболы до нижнего профиля струи, то

$$\frac{a_1}{e_1} = \frac{a_2}{e_2} = \dots = \frac{a_n}{v_n} = k = \text{const.}$$

При этом по Павлову $k = \frac{1}{2}$.

Так как $e = \frac{Q}{\sqrt{v_0^2 + 2gy}}$, то $a_n = e_n k = \frac{Qk}{\sqrt{v_0^2 + 2gy_n}}$, и координаты нижнего профиля струи по фиг. 11 могут быть выражены:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - a \cdot \sin \varphi, \\ \bar{y} &= y + a \cdot \cos \varphi.\end{aligned}$$

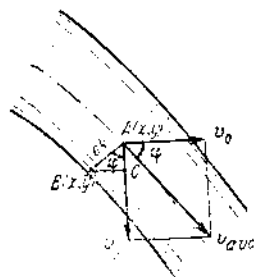
Но $\operatorname{tg} \varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{2x}{p} = 2Px$, если $P = \frac{1}{p}$, а тогда, определив величины $\sin x$ и $\cos x$, окончательно будем иметь:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - \frac{2 Q k P x}{\sqrt{8 P^3 g x^4 + (2 g P + 4 P^2 v_0^2) x^2 + v_0^2}}; \\ \bar{y} &= P x^2 + \frac{Q k}{\sqrt{8 P^3 g x^4 + (2 g P + 4 P^2 v_0^2) x^2 + v_0^2}}.\end{aligned}$$

Так как Павлов не дает никаких указаний относительно величины P , он таким образом не дает и единичного профиля. Условно нами назван профилем его имени профиль, уравнение которого, как и в случае Бовина, $x^2 = 2,044 y$ при $k = 0,5$ и $H = 1,0 \text{ м}$. Для него подсчитаны координаты и приведены в таблице I. Черточки над x и y в таблице опущены. Начало координат смещено вниз по вертикали на половину толщины струи в суженном ее сечении.

2. Новый способ определения координат нижнего профиля струи для условий: $k = \text{const}$ и $v_0 = \text{const}$

Приведенный способ определения координат значительно повышает точность результатов, но он требует громоздких вычислений. Стой же точностью можно произвести эти вычисления, пользуясь более простыми выражениями для $\bar{x}$ и $\bar{y}$.



Фиг. 12.

По фиг. 12 $\bar{y} = y + ek \cdot \cos \varphi$ и $\bar{x} = x - ek \sin \varphi$

но

$$\sin \varphi = \frac{v_y}{v_{abc}} = \frac{\sqrt{2gy}}{\sqrt{v_0^2 + 2gy}}$$

и

$$\cos \varphi = \frac{v_0}{v_{abc}} = \frac{v_0}{\sqrt{v_0^2 + 2gy}}$$

и так как

$$e = \frac{Q}{\sqrt{v_0^2 + 2gy}},$$

то

$$\bar{x} = x - \frac{Qk\sqrt{2gy}}{(\sqrt{v_0^2 + 2gy})^2} = x - \frac{Qk\sqrt{2gy}}{v_0^2 + 2gy};$$

$$\bar{y} = y + \frac{Qkv_0}{(\sqrt{v_0^2 + 2gy})^2} = y + \frac{Qkv_0}{v_0^2 + 2gy}.$$

Обозначив:

 Qk — через A ; $\frac{Qk}{v_0^2}$ — через C ; $\frac{Qkv_0}{\sqrt{2g}}$ — через B ;

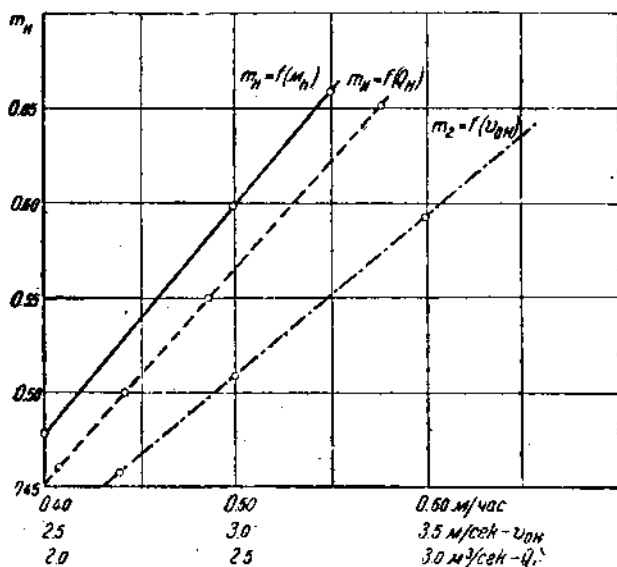
будем иметь:

$$\bar{x} = x - \frac{AB\sqrt{y}}{C + B^2y} \quad \text{и} \quad \bar{y} = y + \frac{A\sqrt{C}}{C + B^2y}.$$

В предположении, что $v_0 = \text{const}$ и $k = \text{const}$, справедливость приведенных выводов очевидна.

13. Построение Людина

Людин по фиг. 2 принимает движение жидкости свободным от суженного



Фиг. 13.

По Базену $h = 1,125 H$; $e_0 = 0,668 h = 0,75 H$. Тогда

$$Q = m_1 h \sqrt{2g} = m_2 H \sqrt{2g}; \quad m_1 = m_H; \quad m_2 = m_H; \quad m_H = 1,195 m_1;$$

$$Q e_0 v_0 = 0,75 v_0 m_H H \sqrt{2gH}; \quad m_H = 0,169 v_0 H; \quad Q = 4,43 m_H.$$

сечения струи и центр тяжести на $\frac{1}{3}$ толщины струи от нижней поверхности; $k = \frac{1}{3}$

Принимая, согласно Людину, для водослива с острой кромкой $\mu = 0,62$, имеем $\frac{2}{3}\mu = 0,413$ и по фиг. 13: $m_H = 0,493$, $v_0 = 2,91$ м/сек. При этом уравнение осевой параболы будет иметь вид:

$$x^2 = 1,73y \text{ для } H = 1,0 \text{ м.}$$

Координаты нижнего профиля струи, по Людину, приводим в таблице I. В той же таблице для установления влияния величины k на профиль нижней поверхности струи приводим профиль под маркой „Людина“, построенный по уравнению осевой параболы $x^2 = 2,044y$. Это уравнение было взято для осевого профиля Павлова и Бовина, но у Павлова $k = 0,5$, у Бовина $k = 0,43$, а у Людина $k = 0,33$.

14. Профиль Моррисона и Броди

Моррисон и Броди дают для сливной части профиля водослива (от гребня и ниже) уравнение:

$$x^2 = 1,8yH \text{ при } k = 0$$

$$x^2 = 1,8y \text{ для } H = 1,0 \text{ м.}$$

Координаты этого профиля приведены в таблице I.

Согласно фиг. 13 и 17, при $e_0 = 0,75$ м для уравнения Моррисона и Броди имеем $q = 2,23$ м³/сек, $v_0 = 2,97$ м/сек и $m_H = 0,502$.

15. Профиль Американской консультации Днепростроя АКД

Американская консультация Днепростроя рекомендовала для Днепровской плотины профиль, который за гребнем выражается уравнением $x^2 = 20y$, а перед гребнем очерчен по дугам окружностей с радиусами $r = 4,75$ м и $r = 1,71$ м, $k = 0$.

Для сливной части единичного профиля уравнение АКД имеет вид:

$$x^2 = 2,227y,$$

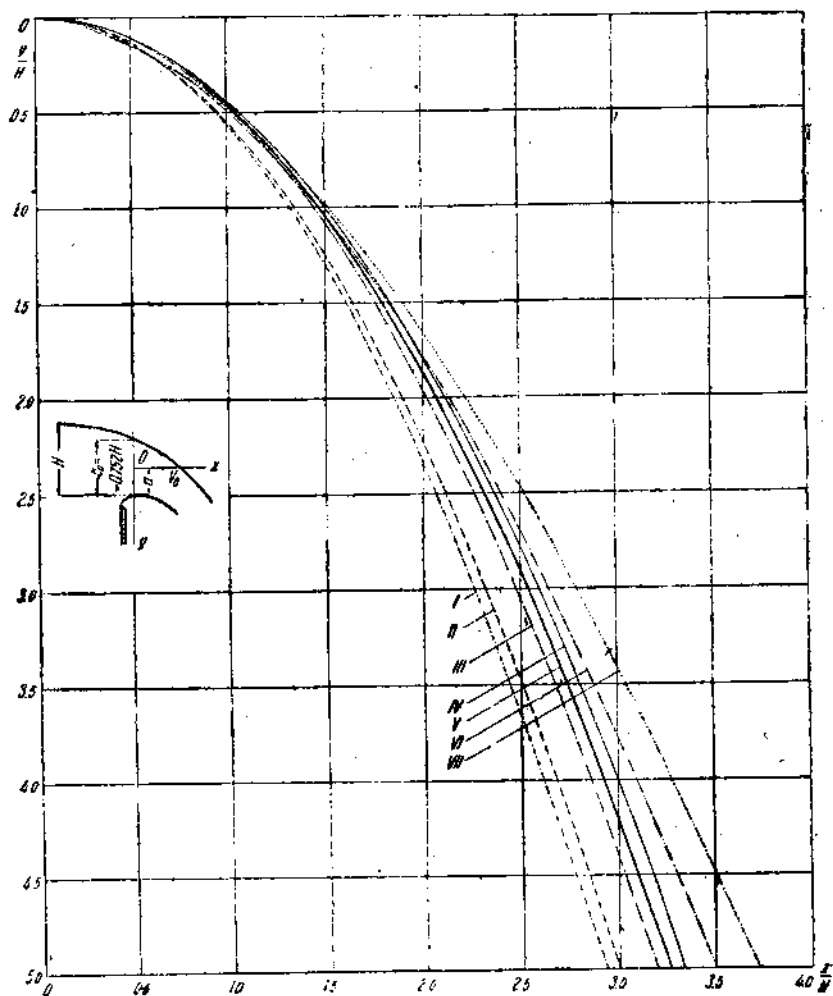
что по фиг. 13 и 17 дает: $q = 2,475$ м³/сек, $v_0 = 3,05$ м/сек и $m = 0,558$.

При пересчете на напор $H = 1,0$ м дуг, сопрягающих гребень с напорной гранью, и по вычислении координат сливной части по уравнению $x^2 = 2,227y$ получены координаты, приведенные в таблице I.

16. Профиль Мюллера

По Мюллеру, очертание верхней части профиля выполняется по экспериментальным данным Базена (фиг. 2), а ниже, т. е. при $x > 0,7$ — по уравнению $x^2 = 2,3Hy$, или $x^2 = 2,3 \cdot 1,125; Hy = 2,59y$; $k = 0$.

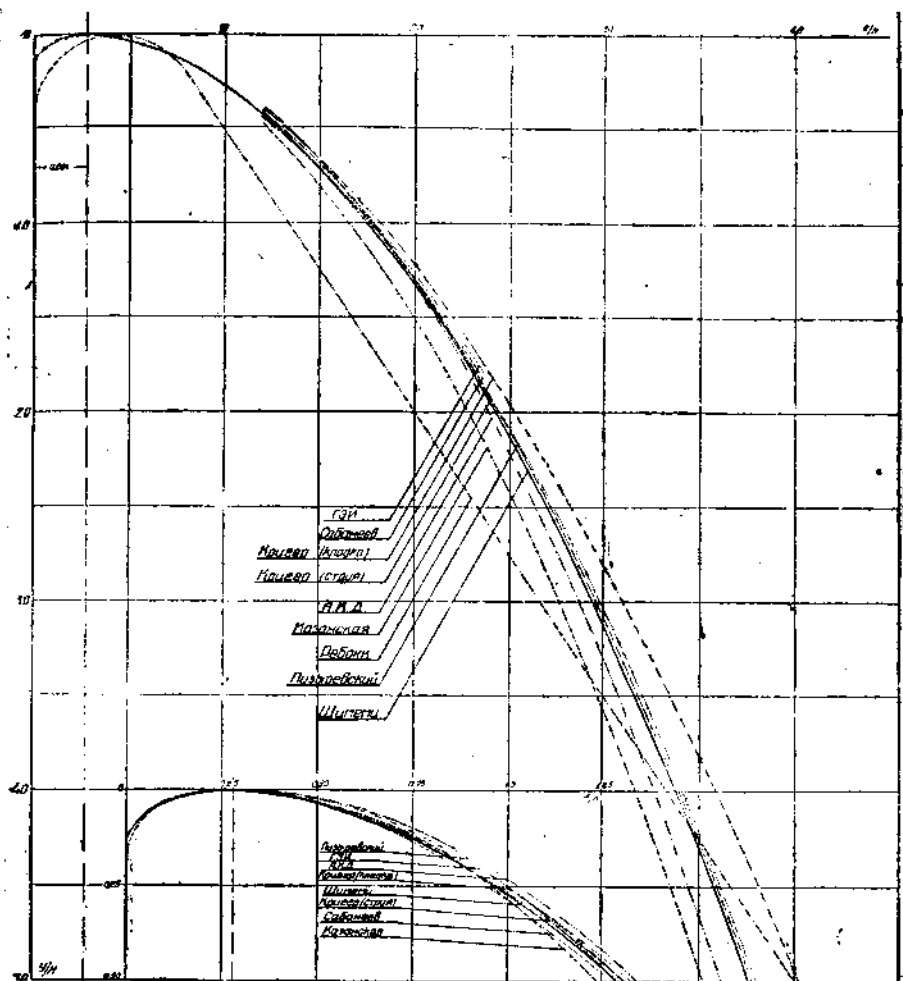
Координаты профиля по Мюллеру приводим в таблице I.



Фиг. 14.

- I профиль Людина $P=1,330$; $K=0,33$
 II профиль Моррисона и Брода $P=1,800$; $K=0,00$
 III профиль Бовина-Павлова-Людина $P=2,044$; $K=0,33-0,50$
 IV профиль Бовина для Днепростроя
 V профиль Дейша $P=2,250$; $K=0,00$
 VI профиль струи по Кригеру $P=2,732$; $K=0,33$
 VII профиль кладки по Кригеру

Уравнение $x^3 = 2,59y$ по фиг. 13 и 17 может иметь место, если $v_0 = 3,56$ м/сек, $m_H = 0,602$ и $Q = 2,67$ м³/сек.



Фиг. 15.

Профиля: 2 ЛЦ-ГЭИ, Сабанеева Кривого (кладва), Кривого (струя); АКД, Казанской Работки, Пузыревского, Шимеми.

17. Профиль Дейша

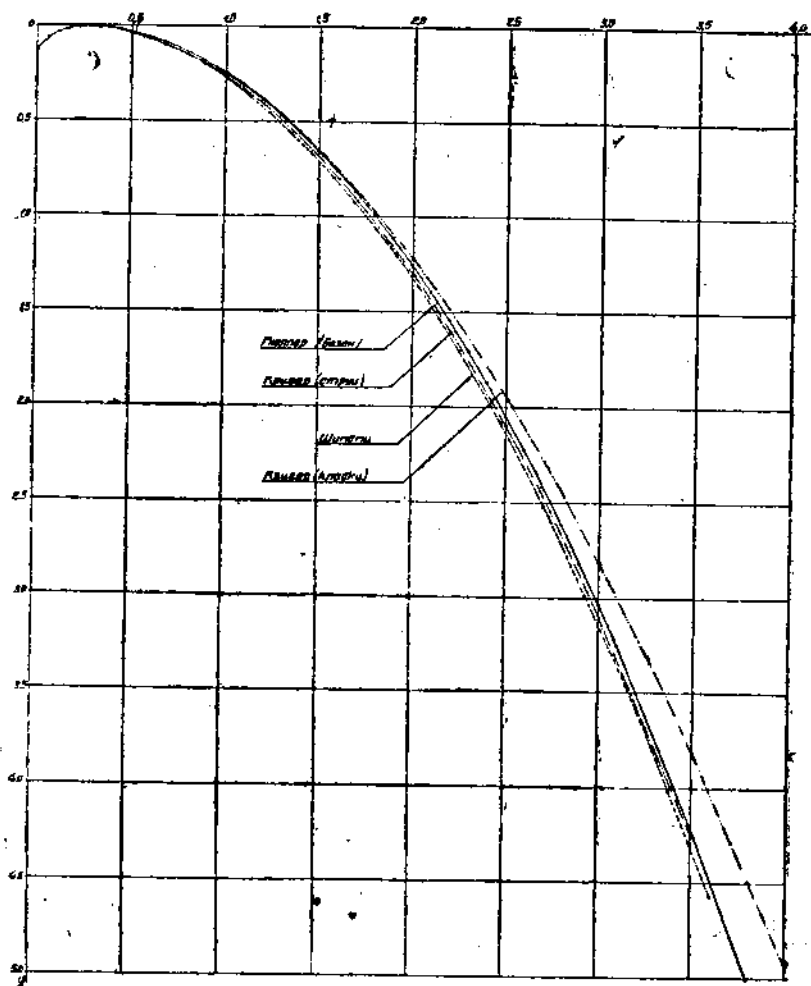
Уравнение сливной части профиля должно иметь вид:

$$x^2 = \frac{2v_0^2}{g} y = \rho y.$$

Так же, как и в случае профилей АКД, Мюллера, Моррисона и Броди, Дейша относит свое уравнение непосредственно к нижнему профилю струи.

$k=0$. (У Дейша указаний относительно величины k нет; Коцени относит его уравнение к нижнему профилю.)

Для определения средней горизонтально составляющей скорости струи $v_0 = \text{const}$ автор профиля исходит из закона о количестве движения. По-



Фиг. 16.

скольку в суженном сечении струи скорости по вертикали имеют различную величину, между частицами жидкости происходит удар, при котором, пренебрегая потерей скорости, сумма количеств движения верхних и нижних частиц должна остаться постоянной, и сумма этих отдельных количеств движения должна быть равна количеству движения струи в целом.

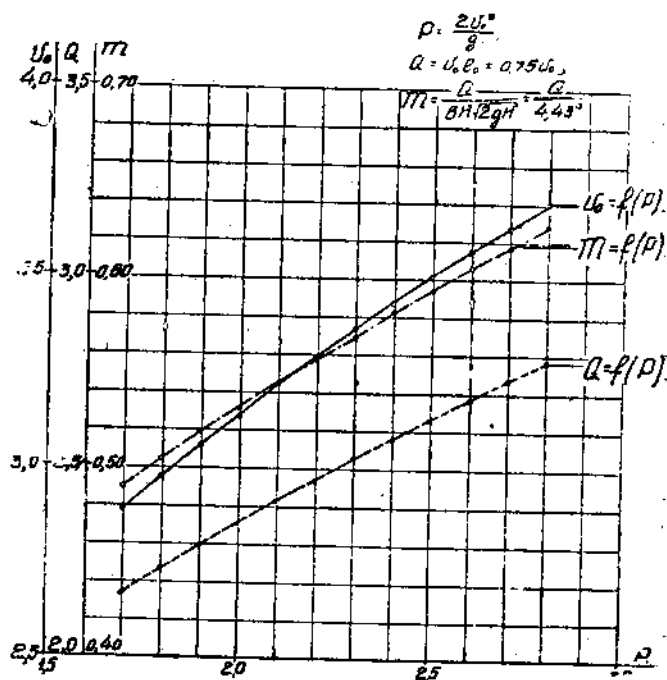
Это означает, что

$$\Sigma (m_{\text{верх}} v_{\text{верх}} + m_{\text{ниж}} v_{\text{ниж}}) = M v_x = M v_0,$$

откуда

$$v_x = v_0 = \int \frac{d(mv)}{M},$$

и так как $v = \sqrt{2gH}$, элементарная масса $dm = \frac{\gamma}{g} \mu \cdot dH \cdot B \sqrt{2gH}$,



Фиг. 17.

$$d(mv) = \frac{\gamma}{g} \mu \cdot dH \cdot B \cdot 2gH = \gamma \mu B \cdot 2H \cdot dH;$$

$$\int d(mv) = \mu \gamma B H^2 + C$$

и

$$M = \frac{\gamma}{g} Q = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{2}{3} \mu B H \cdot \sqrt{2gH},$$

откуда

$$v_x = \frac{\mu \gamma B H^2 \cdot 3g}{2 \gamma \mu B H \cdot \sqrt{2gH}} = \frac{3\sqrt{gH}}{2\sqrt{2}} = v_0.$$

а отсюда

$$p = \frac{2v_0^2}{g} = \frac{2 \cdot 9gH}{g \cdot 8} = 2,25H,$$

и, наконец,

$$x^2 = 2,25Hy,$$

а для

$$H = 1,0 \text{ м}$$

$$x^2 = 2,25y.$$

Координаты профиля по Дейше приведены в таблице 1. По фиг. 13 и 17 уравнение имеет место, когда $v_0 = 3,327 \text{ м/сек}$, $m_H = 0,562$ и $Q = 2,49 \text{ м}^3/\text{сек}$.

18. Сравнение единичных профилей

Заканчивая на этом рассмотрение методов построения профиля водосливной плотины, приведем в заключение, кроме таблицы 1 с координатами единичных профилей, чертежи этих профилей (фиг. 14, 15 и 16).

На первой из этих фигур представлены профили Людина, Моррисона и Броди, Бовина, Павлова и Дейша, — это профили без установленной формы сопряжения напорной грани с гребнем водослива. Здесь же для сравнения приведены профили струи и кладки по Кригеру.

На фиг. 15 приведены профили Кригера, Сабанеева, Американской консультации Днепростроя, Ребокка, Казанской, Пузыревского и Шимеми, — профили, определенные на всех участках, и на фиг. 16 — профили Кригера, Мюллера и Шимеми. Профиль Мюллера выделен нами на отдельный чертеж, с одной стороны, потому, что материал по нему нами получен позднее, а с другой — потому, что чертеж 15 и без того трудно читаем, так что помещение на нем еще одного профиля значительно усложнило бы возможность сопоставлений. На фиг. 16 для сравнений приведены также профили Кригера и Шимеми.

Для более наглядного сопоставления возможных решений задачи о профиле в таблице 4 приведены площади единичных профилей. При этом для определения площади профиля в одном случае мы пользовались аналитическим способом (когда уравнение профиля задано), в другом — планиметрированием по чертежу в крупном масштабе. Для профилей Людина, Моррисона и Броди, Павлова, Дейша и Бовина — профилей без определенной формы сопряжения гребня водослива с напорной гранью, так как для достижения безвакуумности это сопряжение ни в коем случае не может быть менее базеновского и так как, кроме того, в большинстве случаев базеновские данные являлись указанным авторам исходным материалом для построения профиля, — принято базеновское сопряжение напорной грани с гребнем и после этого были определены их площади.

Нами планиметрирование произведено по чертежам профилей в 1:10 натуральной величины и по интервалам от $y=0$ до $y=1$, затем от $y=0$ до $y=2,0$ и т. д. до $y=5,0$.

В тех случаях, где даны уравнения нижнего профиля струи, площади по тем же интервалам вычислены (фиг. 3).

В таблице отсутствуют данные по профилю Мюллера; его площадь во всех интервалах несколько превосходит (на 0,5—1%) площадь нижней поверхности струи по Кригеру.

Процентные соотношения площадей, приводимые в таблице 4, очевидно, будут действительными не только при напоре $H=1,0$ м, но и при всяком другом, но одинаковом для сравниваемых профилей.

Данная таблица, как и фиг. 14, 15 и 16, позволяет наглядно установить диапазон возможных решений задачи о безвакуумном профиле, позволяет сравнить профиль друг с другом с экономической точки зрения и установить их соотношение к вакуумному ребокковскому профилю.

Таблицу 4 и фиг. 14, 15 и 16 при рассмотрении целесообразно сопоставлять с коэффициентами расхода, принятыми в расчет рассматриваемых профилей. Эти коэффициенты могут быть легко установлены, приняв во внимание, что:

- 1) толщина струи в суженном сечении, по данным Базена, $e_0 = 0,75 H$;
- 2) параметр уравнения профиля: $P = \frac{2v_0^2}{g} = \text{const}$;
- 3) параметр P не зависит от величины k , т. е. от положения центра тяжести секундного расхода в толще струи, и
- 4) параметр P , поскольку всеми авторами, кроме Мюллера, центр тяжести или вершина осевой параболы располагается или в суженном сечении струи или до него, всецело приложим и к суженному сечению.

В таком случае через параметр P коэффициент расхода выразится:

$$m_H = m = \frac{Q}{BH\sqrt{2gH}} = \frac{e_0 v_0}{4,43} = \frac{0,75}{4,43} \sqrt{\frac{Pg}{2}} = 0,375 \sqrt{P}$$

и может быть представлен кривой $m = f(P)$ фиг. 17. А тогда или из подсчета или непосредственно по фиг. 17 получаем:

для профиля (струи) Кригера	($P=2,732$); $m=0,620$
" " Дейша	($P=2,250$); $m=0,562$
" " Американской консультации Днепростр.	($P=2,227$); $m=0,558$
" " Бовина	($P=2,044$); $m=0,535$
" " Казанской	$0,427 \cdot 1,195 = m=0,513$
" " "	($P=2,049$; $m=0,537$)
" " Моррисона и Броди	($P=1,800$); $m=0,502$
" " Людина	($P=1,730$); $m=0,493$

При сопоставлении всех приведенных данных становится неизбежным следующий основной и существеннейший вывод:

Только те теоретические профили водослива равновелики по площади экспериментальным (Шимми, 2ЛЦ, Сабангев, Кригер), уравнение которых содержит параметр P , рассчитанный на нереальный, на чрезмерно высокий коэффициент расхода; а профили, выражаемые уравнением с нормальным параметром (Людина и Моррисон), дают площадь на 10% и более меньшую, чем профили экспериментальные. Причина такого западания теоретических профилей под экспериментальные будет выявлена в последующих соображениях.

ТАБЛИЦА 4

А в т о р	Изме- ри- тель	Площадь профиля $y=0$ до $y=$				
		1 м	2 м	3 м	4 м	5 м
Кригер (кладка)	M^2 %	1,254 100	3,446 100	6,252 100	9,589 100	13,395 100
Кригер (нижний профиль струи)	M^2 %	1,229 98	3,350 97,2	6,052 96,8	9,210 96,1	12,812 95,7
Шимеми	M^2 %	1,221 97,2	3,320 96,3	6,003 96,0	9,169 95,7	12,749 95,2
Пузыревский	M^2 %	1,239 98,9	3,352 97,3	6,074 97,2	9,325 97,2	12,935 96,6
Сабансеев	M^2 %	1,213 96,8	3,349 97,3	— —	— —	— —
2ЛЦ	M^2 %	1,252 99,9	3,409 98,9	— —	— —	— —
ДеЙша	M^2 %	1,268 101,1	3,378 98,1	6,027 96,5	9,113 95,0	12,570 93,9
Американская консульта- ция Днепростроя	M^2 %	1,255 100,8	3,370 97,8	6,001 96,1	9,072 94,6	12,515 93,5
Бовин (Днепр)	M^2 %	1,264 100,7	3,386 96,9	5,932 95,3	8,956 93,3	12,335 92,1
$x^2 = 2,044$ у Павлов, Бовин, Людин . . .	M^2 %	1,238 98,8	3,273 95,0	5,816 93,1	8,776 91,5	12,090 90,3
Казанская	M^2 %	1,177 93,9	3,172 92,1	5,705 91,3	8,671 90,5	12,017 89,8
Людин	M^2 %	1,152 91,9	3,037 88,2	5,388 86,3	8,117 84,7	11,176 83,5
Моррисон и Броди	M^2 %	1,164 92,9	3,084 89,6	5,480 87,7	8,269 86,2	11,336 85,1
Ребокк	M^2 %	0,950 75,7	2,617 76,0	4,950 79,2	7,950 82,9	11,617 86,8

19. Первый и основной недостаток аналитических методов построения профиля

Основным элементом, характеризующим методы построения профиля, как мы выше видели, является допущение постоянства параметра P в уравнении профиля или постоянства горизонтальной составляющей скорости струи. При ничтожно малой потере энергии на пути струи от суженного сечения и за ним, по данным различных экспериментаторов, в случае, если к тому же под струей имеет место атмосферное давление, отсутствуют, казалось бы, и основания к изменению P и v_0 . И это изменение величин P и v_0 было бы неизбежным при наличии под струей вакуума (здесь v_0 убывает и становится равной нулю или, при наличии под струей положительного давления, когда $v_{обс} = \sqrt{v_0^2 + 2gy}$, сохраняя указанную зависимость, претерпит изменение в составляющих членах в сторону возрастания v_0).

Если пренебречь весьма небольшим боковым расширением или распластыванием струи, т. е. считать $B = \text{const}$, что при достаточной ширине водослива может быть безоговорочно принято, то при постоянстве горизонтальной составляющей средней скорости v_0 и при $B = 1,0$ должно иметь место равенство:

$$Q = e_0 v_0 = e_1 v_1 = e_2 v_2 = \dots = e_n v_n \text{ при } e_n \perp v_n,$$

которое действительно и для случая вертикальных сечений струн. В таком случае

$$Q = e_0 v_0 = e_1 v_0 = e_2 v_0 = \dots = e_n v_0 \text{ при } v_n \perp e_0$$

и вместе с тем

$$e_0 = e_1 = e_2 = \dots = e_n,$$

т. е. толщина струи, измеренная по вертикали в любом сечении, на участке действия уравнения профиля ее должна быть постоянной.

В свою очередь, поскольку $e_0 = e_1 = e_2 = \dots = e_n$, очевидно, что профиль верхней и профиль нижней поверхности струи должны быть эквидистантными кривыми, т. е. что профиль верхней поверхности струи при сдвиге его по вертикали вниз на величину e_0 должен совместиться с профилем нижней поверхности струи.

Это также означает, что понятие о центре тяжести, при допущении постоянства P , не имеет никакого смысла, ибо при эквидистантности поверхностей струи траектория всякой промежуточной частички жидкости представит одну и ту же кривую, что и верхний или что и нижний профиль. В этом смысле надо считать более последовательными тех авторов, которые считают $k = 0$, т. е. относят уравнение профиля прямо к движению точки по нижнему профилю.

В силу сказанного естественно ожидать постоянства толщины струи e_0 , измеренной по вертикали от аналитических профилей. Это на самом деле и есть (фиг. 18).

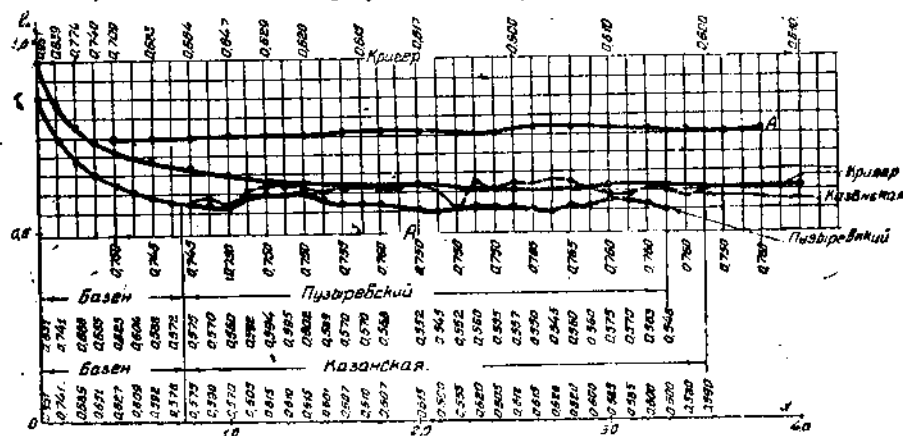
Если исключить из таблицы координат Казанской и Пузыревского участков, построенный по базеновским данным (до $x = 0,7$), то оказывается, что $e_0 = \text{const}$.

Отклонения в величине e_0 в ту и другую сторону от среднего от среднего значения не представляют закономерности и происходят от недостатков графического способа определения координат верхнего и нижнего профилей струи.

То же самое мы имеем и в таблице Кривера. Если исключить из нее экспериментальную часть: $0 < x < 1,5$, то далее мы получаем $e_0 = \text{const}$.

По уравнению $x^2 = 2y$, при $k=0,5$, мы с большой точностью подсчитали координаты нижнего и верхнего профилей струи и, построив чертеж, определили толщины струи. Они оказались одинаковыми для всех сечений, расположенных ниже вершины осевой параболы (кривая А фиг. 18).

Таким образом, допустив $v_0 = v_x = \text{const}$, мы получили, как и следовало ожидать, эквидистантные профили для верхней и нижней струек. Данные



Фиг. 18

же экспериментов в корне противоречат эквидистантности. Они показывают, что по мере удаления от острого гребня водослива толщина струи, измеряемая по вертикали, вначале быстро, затем медленно убывает, а вместе с тем вначале быстро и затем медленно возрастает горизонтально составляющая средней скорости струи.

Пределы изменения e_x и v_x можно проследить по помещенной ниже таблице, составленной нами по чертежам Базена, Коха и Карстаньена, Ребokka, Кривера и Шимеми.

ТАБЛИЦА 5

Исследователь	Изменение e_x в интервале от $x=0$ до $x=0,25$	Изменение e_x в интервале от $x=0,25$ до $x=0,7$	Изменение e_x в интервале от $x=0,7$ до $x=1,5$	Всего на исследов. участке
Базен %	$\frac{0,857 - 0,668}{0,857} = 21,4$	$\frac{0,668 - 0,569}{0,668} = 14,8$	—	33,6
Кох и Карстаньен %	$\frac{0,255 - 0,200}{0,250} = 22,0$	$\frac{0,200 - 0,171}{0,200} = 14,50$	—	33,0

Продолжение таблицы 5

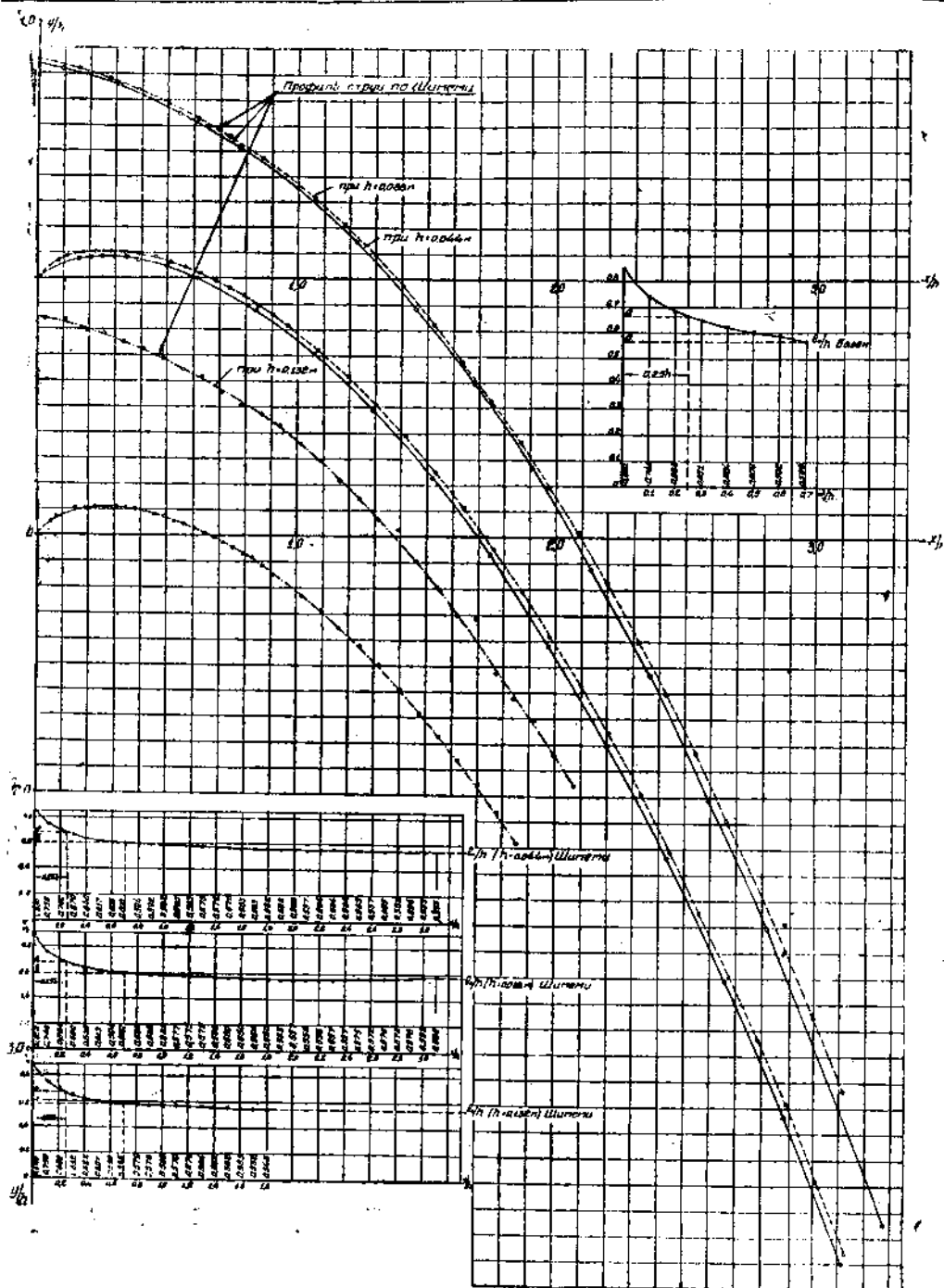
Исследователь	Изменение e_x в интервале от $x=0$ до $x=0,75$	Изменение e_x в интервале от $x=0,25$ до $x=0,7$	Изменение e_x в интервале от $x=0,7$ до $x=1,5$	Всего на исследов. участке
Кригер %	$\frac{0,951 - 0,740}{0,951} = 22,0$	$\frac{0,740 - 0,664}{0,740} = 10,0$	$\frac{0,664 - 0,627}{0,664} = 5,6$	34,2
Ребокк %	$\frac{85 - 66}{85} = 22,4$	—	—	22,4
Шимми при $h=0,132$. . . %	$\frac{0,840 - 0,670}{0,840} = 20,5$	$\frac{0,670 - 0,585}{0,670} = 12,6$	$\frac{0,585 - 0,562}{0,585} = 4,0$	32,5
Шимми при $h=0,088$. . . %	$\frac{0,850 - 0,674}{0,850} = 20,5$	$\frac{0,674 - 0,590}{0,674} = 12,5$	$\frac{0,590 - 0,560}{0,590} = 5,0$	34,0
Шимми при $h=0,044$. . . %	$\frac{0,830 - 0,630}{0,830} = 18,0$	$\frac{0,680 - 0,600}{0,680} = 12,0$	$\frac{0,600 - 0,570}{0,600} = 5,0$	31,0
В среднем . . . %	21,0	12,7	5,0	

Исследование толщины струи e_x и скорости v_x , насколько нам известно, производится здесь впервые.

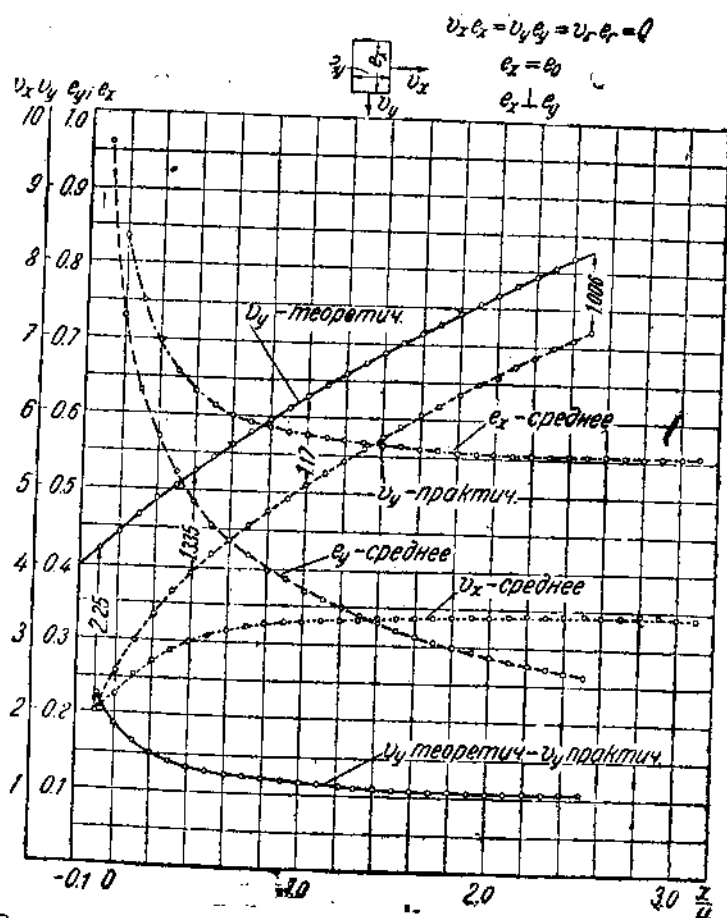
До сих пор полагали, что если на участке до суженного сечения струи (фиг. 1; $x=0,25h$) e_x может претерпевать некоторые изменения, то, во всяком случае, начиная с этого сечения и ниже, $e_x = e_x = \text{const}$ и $v_x = \text{const}$. Таблица говорит об ошибочности этого взгляда. Суженного сечения струи нет; струя сужается на всем пути ее движения, и v_x на том же пути возрастает.

Изменение толщины струи совершенно невозможно объяснить ее расширением, расправыванием, так как при различных длинах водосливов в опытах Базена, Коха, Ребокка, Кригера и Шимми не могло получиться совпадающих характеристик изменения e_x . Его нельзя, по той же причине, объяснить избытком давления под переливающейся струей. Изменение толщины струи и скорости может быть объяснено лишь наличием гидростатического сверхатмосферного давления в толще струи во всех тех сечениях, между которыми происходят изменения e_x и v_x (фиг. 2 и 4).

Избыточное давление в „суженном сечении струи“, как показывали наши подсчеты, вполне обеспечивает возрастание скорости v_x в размерах, указанных в таблице: именно в размере 21% от острого гребня водослива до суженного сечения, в размере 12,7% — от $x=0,25$ до $x=0,7$ и 5% — от $x=0,7$ до $x=1,5$ (фиг. 19).



На фиг. 19 представлены профили верхней и нижней поверхностей струи по данным опытов Шимеми (таблица 2). По этим профилям измерены толщины струи по вертикали e_x и по горизонтали e_y , составлены таблицы 6 и 7,



Фиг. 20. Осредненные данные Шимеми. Начало координат на острой кромке водослива.

построены кривые $e_x = f\left(\frac{x}{h}\right)$ на фиг. 19 и на фиг. 20 — кривые по осредненным данным: $e_x = f\left(\frac{x}{h}\right)$, $e_y = f\left(\frac{y}{h}\right)$, $v_x = f\left(\frac{x}{h}\right)$ и $v_y = f\left(\frac{y}{h}\right)$.

При составлении таблиц расход через водослив принят равным $1,9 \text{ м}^3/\text{сек}$ (для $h = 1,0 \text{ м}$); он соответствует вычисленному Казанской для базеновского водослива.

ТАБЛИЦА 6

№ по пор.	x	e_x при $h=0,132$	e_x при $h=0,088$	e_x при $h=0,044$	e_x среднее	$v_{хср} =$ $\frac{1,9}{e_{хср}}$	Примечания
1	0,0	0,840	0,850	0,830	0,835	2,275	Толщина струи пересчитана на напор $h=1,0$ м
2	0,1	0,750	0,748	0,750	0,750	2,533	
3	0,2	0,699	0,691	0,700	0,700	2,714	
4	0,3	0,652	0,660	0,670	0,657	2,891	$e_{хср}$ определена графическим путем
5	0,4	0,622	0,632	0,640	0,632	3,006	
6	0,5	0,607	0,613	0,617	0,613	3,099	q принято равным 1,9 м ³ /сек
7	0,6	0,590	0,604	0,606	0,600	3,166	
8	0,7	0,585	0,590	0,600	0,593	3,204	
9	0,8	0,579	0,585	0,594	0,585	3,250	
10	0,9	0,578	0,582	0,592	0,580	3,275	
11	1,0	0,580	0,582	0,592	0,577	3,290	
12	1,1	0,570	0,577	0,583	0,575	3,304	
13	1,2	0,572	0,575	0,583	0,572	3,322	
14	1,3	0,564	0,575	0,575	0,570	3,335	
15	1,4	0,562	0,566	0,572	0,567	3,350	
16	1,5	0,562	0,560	0,570	0,565	3,363	
17	1,6	0,553	0,550	0,563	0,560	3,390	
18	1,7	0,552	0,550	0,563	0,560	3,390	
19	1,8	0,546	0,550	0,552	0,558	3,403	
20	1,9	—	0,553	0,568	0,558	3,403	
21	2,0	—	0,557	0,563	0,558	3,403	
22	2,1	—	0,556	0,557	0,558	3,403	
23	2,2	—	0,556	0,564	0,558	3,403	
24	2,3	—	0,557	0,564	0,557	3,410	
25	2,4	—	0,551	0,564	0,557	3,410	
26	2,5	—	0,575	0,553	0,556	3,417	
27	2,6	—	0,512	0,551	0,556	3,417	
28	2,7	—	0,510	0,555	0,555	3,420	
29	2,8	—	0,573	0,553	0,555	3,420	
30	2,9	—	0,578	0,554	0,555	3,420	
31	3,0	—	0,592	0,555	0,555	3,420	
32	3,1	—	0,590	0,555	0,555	3,420	

ТАБЛИЦА 7

№ по пор.	v	e_y при $h=0,132$	e_y при $h=0,088$	e_y при $h=0,044$	e_y среднее	$v = \frac{1,9}{e_{уср}}$	$v_y =$ $\sqrt{2gh}$	Примечание
1	-0,1	0,930	0,970	—	0,961	1,978	4,20	Здесь h считается от горизонта воды перед водосливом до данного сечения
2	+0,0	0,720	0,730	0,745	0,732	2,583	4,43	
3	0,1	0,520	0,630	0,650	0,636	2,993	4,65	
4	0,2	0,569	0,570	0,590	0,570	3,337	4,86	
5	0,3	0,520	0,520	0,530	0,522	3,646	5,06	
6	0,4	0,485	0,488	0,500	0,487	3,904	5,24	
7	0,5	0,450	0,458	0,470	0,459	4,145	5,43	
8	0,6	0,425	0,410	0,448	0,437	4,352	5,61	
9	0,7	0,410	0,420	0,425	0,417	4,558	5,78	

Продолжение таблицы 7

№ по пор.	y	e_y при $h=0,132$	e_y при $k=0,088$	e_y при $y=0,044$	e_y среднее	$v_y = \frac{1,9}{e_y \cdot r}$	$v_y = \sqrt{2gh}$	Примечание
10	0,8	0,400	0,400	0,405	0,398	4,773	5,945	e_y определена графически
11	0,9	0,390	0,385	0,330	0,386	4,923	6,11	
12	1,0	—	0,370	0,370	0,372	5,108	6,265	
13	1,1	—	0,360	0,335	0,361	5,272	6,420	
14	1,2	—	0,350	0,345	0,351	5,427	6,570	
15	1,3	—	0,340	0,340	0,340	5,590	6,720	
16	1,4	—	0,330	0,330	0,331	5,753	6,830	
17	1,5	—	0,320	0,323	0,322	5,903	7,005	
18	1,6	—	0,310	0,318	0,317	6,063	7,145	
19	1,7	—	0,300	0,305	0,307	6,193	7,28	
20	1,8	—	0,300	0,300	0,300	6,330	7,41	
21	1,9	—	0,235	0,236	0,234	6,437	7,55	
22	2,0	—	0,237	0,278	0,286	6,596	7,67	
23	2,1	—	0,282	0,272	0,283	6,734	7,80	
24	2,2	—	0,270	0,270	0,277	6,863	7,93	
25	2,3	—	0,275	0,265	0,273	6,975	8,03	
26	2,4	—	0,265	0,260	0,263	7,104	8,175	
27	2,5	—	0,260	0,255	0,263	7,224	8,29	

Наряду с изменением e_x и v_x , как показывают фиг. 20 и таблицы, может быть отмечено несоответствие роста вертикальной составляющей скорости. v_y отстает от величины $\sqrt{2g(h+y)}$; она, кроме того, не находится в постоянной в определенной связи с $\sqrt{2g(v+h)}$.

Если по фактическим скоростям v_y подсчитать положение вершины параболы или точку начала свободного падения, то оказывается, что всякой величине v_y соответствует свое начало.

Так, мы получаем на основании данных таблицы 7 таблицу 8.

ТАБЛИЦА 8

y	$y+h$	$v_{y \text{ факт.}}$	$v_{y \text{ факт.}}^3$	$y' = \frac{v_{y \text{ факт.}}^3}{2g}$	$y+h-y'$	Примечания
0,0	1,0	2,589	6,703	0,342	0,660	(y+h-y') — положение точки начала свободного падения струи
0,5	1,5	4,145	17,203	0,876	0,625	
1,0	2,0	5,103	26,100	1,33	0,670	
1,5	2,5	5,933	34,850	1,775	0,725	
2,0	3,0	6,596	43,500	2,215	0,785	
2,5	3,5	7,224	53,203	2,660	0,843	
						Выпадение точки $y=0,0$ из ряда очевидно, происходит от погрешности в определении величины e_y

Если принятый нами расход $q=1,9$ м³/сек несколько не соответствует данным опытов Шимеми, все же при изменении абсолютных величин $(y+h-y')$ характер изменения кривой $(y+h-y')=f(y)$ сохранится. Этот характер изменения говорит, что с изменением v_x скорость падения струи в какой-

либо точке не может быть точно определена по формуле Торичелли. Эта скорость будет всегда меньше $\sqrt{2gy}$.

Отсюда следует, что уравнение траектории движения центра тяжести струи или точки струи на нижнем ее профиле в общепринятой параметрической форме:

$$x = v_0 t \text{ и } y = \frac{gt^2}{2}$$

или в форме

$$x^2 = py$$

не соответствует действительной картине явления и потому не применимо для построения профиля водослива или профиля нижней поверхности струи.

Вследствие неучета возрастания скорости v_x и замедленного роста скорости v_y , уравнение $x^2 = py$ дает профиль, меньший по сечению, чем экспериментальный. Разница в площадях будет тем больше, чем ближе к действительному будет взят коэффициент расхода в расчет профиля. Разница будет тем больше, чем ближе к острому гребню водослива будет принята вершина осевой параболы при измерении расстояния по оси x . Приняв преувеличенный коэффициент расхода, мы можем получить профиль водослива, равновеликий экспериментальному, однако характер самого уравнения (квадратичное) не может соответствовать действительной картине явления и не страшает профиль от вакуума. Уравнение профиля при наличии горизонтального ускорения j_x должно иметь степень, во всяком случае, не менее третьей, независимо от положения центра тяжести в толще струи.

В этом основная ошибка современных методов построения профиля.

Из таблиц 6 и 7, кроме указанных выше закономерностей, обнаруживается, что с ростом напора, приведенного к единичному, возрастают скорости v_x и v_y , приведенные к тому же единичному напору.

20. Степень уравнения движения центра тяжести секундного расхода

В заключение настоящего раздела приведем здесь соображения относительно степени уравнения движения центра тяжести секундного расхода.

Мы установили, что при переливе струн через базеновский водослив вертикальная составляющая скорости, подсчитываемая всеми исследователями по формуле $\bar{v}_y = \sqrt{2gy}$, в действительности остаётся всегда меньше $\sqrt{2gy}$, что иллюстрирует таблица 8. Если принять, что в любом горизонтальном сечении струи $v_y = \sqrt{2gy}$, то получается, что, чем ниже взято сечение, тем ниже должна быть принята вершина параболы, или начало счета y . Так, при сечении, лежащем на 0,5 м ниже гребня водослива, нулевое значение y должно быть расположено на 0,625 м ниже горизонта верхнего бьефа,

в сечении струи, расположенном на 2,5 м ниже гребня, нулевое значение y лежит уже на 0,840 м под горизонтом воды в верхнем бьефе.

Следует при этом заметить, что в действительности установленная закономерность должна проявиться резче, так как распластование струи, безусловно имеющее место в экспериментах, сглаживает эту зависимость.

Стало быть, для движения по оси y уравнение должно быть записано в виде:

$$y = k \left(\frac{gt^2}{2} \right), \text{ где } k < 1,0; k — \text{перемен}$$

$$v_y = n \sqrt{2gy}, \text{ где } n < 1,0; n — \text{перемен}$$

Анализом этих уравнений мы заниматься не будем; для анализа необходимы данные контрольных опытов. Мы останавливаем на этом внимание исследователей. По всей вероятности, уравнение $y = k \frac{gt^2}{2}$ не увеличит степени общего

уравнивания движения.

Рассмотрим уравнение движения по оси x — x . Исследователями принималось $x_0 = v_0 t$, что, как здесь установлено, не имеет основания; v_0 суть переменная величина (v_x в нашем обозначении). Согласно таблице 7 величина v_x изменяется следующим образом (графы 1, 2 таблицы 9);

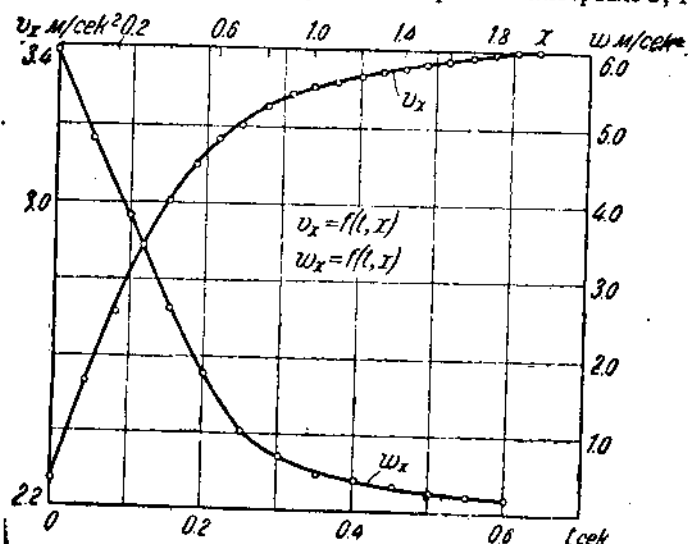
ТАБЛИЦА 9

x	v_x	v_x уравни.	$t_{\max}$	$t_{\min}$	t_{optim}	$\sum_{\sigma} t_{\text{optim}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
0,0	2,375	2,275	0,043956	—	0,041717	0,000000	
0,1	2,533	2,533	0,039479	0,039479	0,038162	0,011717	
0,2	2,714	2,714	0,036846	0,036846	0,035718	0,079879	
0,3	2,891	2,891	0,034590	0,034590	0,033923	0,115597	
0,4	3,006	3,006	0,033237	0,033267	0,032767	0,149525	
0,5	3,099	3,399	0,032238	0,032263	0,031927	0,182292	
0,6	3,165	3,166	0,031586	0,031586	0,031393	0,214219	
0,7	3,204	3,205	0,031201	0,031201	0,030975	0,245612	
0,8	3,250	3,252	0,030750	0,030750	0,030605	0,276587	
0,9	3,275	3,283	0,030460	0,030460	0,030272	0,307192	
1,0	3,290	3,302	0,030185	0,030285	0,030217	0,337464	
1,1	3,304	3,317	0,030151	0,030151	0,030075	0,367681	
1,2	3,322	3,334	0,030000	0,030000	0,029945	0,397756	
1,3	3,335	3,346	0,029890	0,029890	0,029840	0,427701	
1,4	3,350	3,357	0,029790	0,029790	0,029740	0,457541	
1,5	3,363	3,368	0,029690	0,029690	0,029645	0,487281	
1,6	3,390	3,378	0,029600	0,029600	0,029566	0,516926	
1,7	3,390	3,386	0,029530	0,029530	0,029494	0,545492	
1,8	3,403	3,395	0,029455	0,029455	0,029433	0,575986	
1,9	3,403	3,400	0,029412	0,029412	0,029401	0,605419	
2,0	3,403	3,403	—	0,029390	—	0,63432	
		$\Sigma x =$	0,642200	0,627630	0,63432		

интервала $0 \leq x \leq 2,0$
ср. равняется 3,1505 м/сек

Изобразив кривую $v_x = f(x)$ на чертеже в крупном масштабе, графически выравниваем ход кривой. Полученные при этом значения v_x представлены в таблице 9 (графа 3). В зависимости от времени скорость v_x может характеризоваться графами 4, 5, 6 и 7, из которых графы 4, 5 и 6 обозначают время, в которое при данной скорости $v_{\max}$, $v_{\min}$ и v_{opt} может быть пройден интервал $[(x+1)-x]$ по оси $x-x$, и графа 7 означает время, в которое при данных скоростях струя проходит по оси $x-x$ интервал от $x=0$ до x , равного данному.

За 0,63482 секунды струя проходит от гребня водослива интервал от $x=0$ до $x=2,0$. При этом средняя скорость в интервале 3,1505 м/сек



Фиг. 21.

По данным таблицы 9 построим кривую $v_x = f(\sum_{i=0}^n t_{\text{орит}}, x)$, или, как будем в дальнейшем обозначать, просто $v_x = f(t; x)$ (фиг. 21).

Уже из того, что кривая $\frac{dx}{dt} = v_x = f(t)$ не представляет прямой линии, можно заключить, что уравнение $x = f(t)$ будет иметь степень выше второй. Это уравнение было бы первой степени, если бы $v_x = f(t)$ была параллельна оси t ; это уравнение было бы второй степени, если бы $v_x = f(t)$ представляла прямую под углом к оси. Стало быть, уравнение $x = f(t)$ имеет степень выше второй и не ниже третьей.

Рассмотрим теперь вторую производную от уравнения $x = f(t)$. По фиг. 21 мы имеем графы 1 и 2 таблицы 10 и по известным t и v_x определяем Δv_x , а затем и w_x . Кривую $w_x = f(t)$ нанесем на ту же фиг. 21.

Поскольку $w_x = f(t)$ — не прямая, параллельная оси t , не может быть и речи о квадратичном уравнении $x = f(t)$; поскольку $w_x = f(t)$ — не прямая под углом к оси t , не может быть речи и об уравнении третьей степени.

Мы не будем далее анализировать кривые; это может представить материал для самостоятельной темы, но уже из приведенного здесь явствует, что уравнение $x = f(t)$ должно быть степени выше второй.

То же мы получили и при анализе экспериментальных данных Кригера. В силу сказанного, поскольку одно из составляющих уравнений будет иметь степень, хотя бы четвертую, общее уравнение, очевидно, будет иметь не низшую степень.

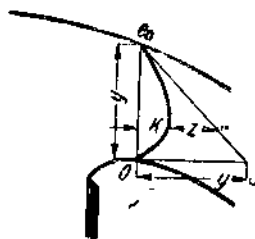
ТАБЛИЦА 10

t	v_x	Δv_x	$\frac{\Delta v_x}{\Delta t} = w_x$
0,00	2,275	0,298	5,96
0,05	2,573	0,242	4,84
0,10	2,815	0,191	3,82
0,15	3,006	0,131	2,62
0,20	3,137	0,089	1,78
0,25	3,226	0,051	1,02
0,30	3,277	0,035	0,70
0,35	3,312	0,024	0,48
0,40	3,336	0,020	0,40
0,45	3,356	0,016	0,32
0,50	3,372	0,012	0,24
0,55	3,384	0,010	0,20
0,60	3,394	0,008	0,16
0,65	3,402	—	—

Рассмотрим теперь еще вопрос о балансе энергии.

21. Баланс энергии

Ввиду особой важности рассмотренных в настоящем разделе работы процессов в переливающейся струе приведем здесь подсчет баланса энергии. Возьмем для этого одно сечение в верхнем бьефе, до водослива, там где влияние последнего не сказывается, и другое — в так называемом суженном сечении струи. Для сечения суженного будем руководствоваться при подсчете баланса эпорами распределения скоростей и давлений, полученными Базеном (фиг. 22) для верхнего бьефа — средней скоростью и глубиной. Сечения, как и у Базена, примем вертикальные, что, правда, приведет нас к некоторому преуменьшению кинетической энергии в „сужении“. По всей вероятности, это преуменьшение выразится максимум 5%.



Фиг. 22.

В суженном сечении кинетическая энергия будет равна при длине водослива, равной единице:

$$\mathcal{E}_{кин} = \frac{1}{2g} \int_0^{z_0} v_x^3 \cdot dy.$$

Здесь v_x — горизонтальная составляющая скорости струи, зависящая от глубины погружения. Ее величина приведена по данным Базена в статье

Казанской („Известия Государственного гидрологического института“ № 20 за 1927 г., таблица 5); откуда мы ее и возьмем для определения интеграла. Величины v_x и v_x^3 приводим в таблице 11.

ТАБЛИЦА 11

Глубина погружения	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32
v_x	2,195	2,250	2,310	2,370	2,460	2,520	2,610	2,700	2,790
v_x^3	10,580	11,391	12,326	13,312	14,887	16,003	17,780	19,683	21,718

Глубина погружения	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,668
v_x	2,900	3,010	3,140	3,280	3,455	3,650	3,875	4,130	4,190
v_x^3	24,339	27,271	30,959	35,288	41,244	48,627	58,200	70,445	73,560

Величина dy , как видно, во всех случаях, кроме последнего (последний столбец), равна 0,04 м.

Произведя теперь подчеты, получаем $\left(\int_0^{e_0} v_x^3 \cdot dy \right)_{\min} = 18,1188$;

$\left(\int_0^{e_0} v_x^3 \cdot dy \right)_{\max} = 20,6006$ и среднее значение $\int_0^{e_0} v_x^3 \cdot y = 19,360$, а тогда

$$\mathcal{E}_{\min} = \frac{19,360}{19,62} = 0,988 \text{ м.}$$

Отсюда скоростной напор $S = \frac{\mathcal{E}_{\min}}{Q} = \frac{0,988}{1,976} = 0,5 \text{ м.}$

Здесь Q определено по приведенной таблице 11 как $\left(\int_0^{e_0} v_x \cdot dy \right)_{\text{средн.}}$

Если бы тот же подсчет был произведен по средней скорости $v_x = \frac{Q}{e_0} = \frac{1,976}{0,668} = 2,96 \text{ м/сек}$, мы имели бы скоростной напор $S_{cp} = \frac{v_{cp}^2}{2g} = 0,447 \text{ м}$, а отсюда для суженного сечения коэффициент Кориолиса

$$\Delta = \frac{S_{cp}}{S} = \frac{0,5}{0,447} = 1,12.$$

Стало быть, при подсчете скоростного напора по средней скорости мы преуменьшили бы его величину на $12\%_{/0}$.

В том случае, если бы давление в точке толщн струи в „суженном сечении“ равнялось гидростатическому, можно было бы, отложив отрезок S над горизонтом воды в „сужении“, получить линию энергии. В данном случае давление меньше гидростатического, и потому отрезок S следует отложить от точки, располагающейся внутри толщн струи. Положение этой точки может быть найдено следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{пот}} = \mathcal{E}_y \pm \mathcal{E}_z.$$

Как это видно из фиг. 22,

$$\mathcal{E}_{\text{пот}} = \mathcal{E}_y - \mathcal{E}_z,$$

или:

$$\mathcal{E}_{\text{пот}} = \int_0^{e_0} k_x v_x \cdot dy = \int_0^{e_0} y_x v_x \cdot dy - \int_0^{e_z} z_x v_x \cdot dy.$$

Отсюда очевидно, что лишь в случае, когда эпюра y равна эпюре давлений z , мы будем иметь свободное движение жидкости вдоль оси x . Это движение не будет в данном случае свободным, поскольку $k = y - z$. Мы будем иметь ускоренное движение под влиянием силы, эквивалентной напору от эпюры k .

Выражая потенциальную энергию напорами, будем иметь $k = y - z$, что показывает, что для получения точки на линии энергии отрезок S следует отложить не от точки e_0 (фиг. 22), а от точки, располагающейся на глубине z под точкой e_0 .

$$\text{Отрезок } k = \frac{\mathcal{E}_{\text{пот}}}{Q}; \text{ отрезок } z = \frac{\mathcal{E}_z}{Q} \text{ и отрезок } y_x = \frac{\mathcal{E}_y}{Q}.$$

Для подсчета $\mathcal{E}_{\text{пот}}$, $\mathcal{E}_z$ и $\mathcal{E}_y$ воспользуемся опять-таки данными Базена, обработанными в таблице 12.

ТАБЛИЦА 12

№ точки	v_x	v_x	k_x	Z_x	dy
1	2,195	0,00	0,000	0,000	
2	2,250	0,04	0,016	0,024	0,04
3	2,310	0,08	0,040	0,040	0,04
4	2,370	0,12	0,064	0,056	0,04
5	2,460	0,16	0,084	0,076	0,04
6	2,520	0,20	0,100	0,100	0,04
7	2,610	0,24	0,118	0,122	0,04
8	2,700	0,28	0,134	0,146	0,04
9	2,790	0,32	0,155	0,165	0,04
10	2,900	0,36	0,162	0,198	0,04
11	3,010	0,40	0,172	0,228	0,04
12	3,140	0,44	0,180	0,260	0,04
13	3,280	0,48	0,169	0,311	0,04
14	3,455	0,52	0,158	0,362	0,04
15	3,650	0,56	0,136	0,424	0,04
16	3,875	0,60	0,104	0,496	0,04
17	4,130	0,64	0,040	0,600	0,04
18	4,190	0,668	0,000	0,668	0,028

При этом получаем:

$$\mathcal{E}_{пот} = \int_0^6 k_x v_x \cdot dy = 0,22135 \text{ тм в среднем};$$

$$\mathcal{E}_z = 0,512 \text{ тм}$$

и

$$z = \frac{\mathcal{E}_z}{Q} = 0,261 \text{ м}$$

Высота линии энергии над точкой e_0 тогда будет

$$S - z = 0,500 - 0,261 = 0,239 \text{ м.}$$

В сечении верхнего бьефа, при $w = 1,13 \text{ м}$; $h = 1,0 \text{ м}$; $w + h = 2,13 \text{ м}$;
 $Q = 1,976 \text{ м}^3/\text{сек.}$

$$v_{подх} = 0,928 \text{ м}^3/\text{сек.}; v_{подх}^2 = 0,862 \text{ м}^2/\text{сек.}^2;$$

скоростной напор равен $0,044 \text{ м}$ и высота линии энергии над дном: $2,13 + 0,044 = 2,174 \text{ м}$.

В суженном сечении линия энергии располагается над дном на высоте:

$$1,13 + 0,112 + 0,668 + 0,239 = 2,149 \text{ м (фиг. 1).}$$

Расхождение в высоте линии энергии, именно снижение ее в суженном сечении, объясняется, с одной стороны, потерями энергии, а с другой — тем, что мы производили здесь подсчет кинетической энергии по горизонтальным составляющим скорости. Снижение линии энергии выражается $2,174 -$

$2,149 = 0,025 \text{ м}$ и составляет $\frac{0,025}{0,500} 100 = 5\%$ от скоростного напора.

Коэффициент Кориолиса для верхнего бьефа можно считать равным единице.

В „суженном сечении“ струи мы имеем запас потенциальной энергии $\mathcal{E}_{пот} = 0,221 \text{ тм}$. Эта энергия делает движение струи принужденным и создает ту добавочную скорость в горизонтальном направлении, о которой мы упоминали выше. Величина добавочной скорости может быть определена из:

$$v = \sqrt{2gk} = \sqrt{2g \frac{\mathcal{E}_{пот}}{Q}} = 4,43 \sqrt{\frac{0,22135}{1,976}} = 1,48 \text{ м/сек.}$$

Следует заметить, что преобразование потенциальной энергии в кинетическую и здесь, как и в вышерасположенных сечениях, не происходит мгновенно, а происходит на некотором пути, внутри интервала $0 < \frac{x}{H} < 2,0$ или даже $< 2,5$.

Отношение потенциальной энергии к полной в „суженном сечении“ выражается $\frac{\mathcal{E}_п}{\mathcal{E}_k + \mathcal{E}_п} = \frac{0,221}{0,988 + 0,221} = 0,183$. Это отношение может быть названо коэффициентом реактивности, подобно тому, как это принято в учении о гидравлических двигателях. Коэффициент реактивности будет на пути x , очевидно, различным.

Следовательно, наличие энергии в виде эюры k по фиг. 22 создает ускорение струи j_x .

Следует отметить, что определение кинетической энергии по горизонтальной составляющей скорости, как это делают Кох, Карстаньен и Кеутнер, совершенно невозможно. Горизонтальная составляющая скорости струи, как то следует из фиг. 27, даже при возрастании на 20% (см. таблицу 5) на участке ниже сечения „суженного“ даст максимальное изменение кинетической энергии на $(1,2^2 - 1) = 0,44$, пусть даже наполовину против $\mathcal{E}_{кин}$ в сужении. В действительности, поскольку абсолютная скорость (фиг. 27) может возрасти вдвое, второе и т. д. раз, $\mathcal{E}_k$ должна иметь неограниченные пределы изменения. Практически для открытого погока, по данным Шоклига, $v_{макс} = 22,0 \text{ м/сек}$, и, стало быть, $\mathcal{E}_{кин}$ ограничена этой величиной скорости. По данным исследований Днепровской плотины, еще без видимого нарушения сплошности, $v_{макс}$ струи $\approx 25,0 \text{ м/сек}$.

Рассмотрим теперь еще один пример, из которого уясняется несовместимость свободного движения с наличием избыточного (надатмосферного) давления в толще струи. Пример этот возьмем из гидравлики Бахметева (стр. 125).

Точнейшими измерениями Базен из опытов над изменением сечения струи при истечении жидкости через круглое отверстие диаметром 0,2 м в горизонтальной тонкой стенке установил следующую зависимость по таблице 13.

ТАБЛИЦА 13

$\frac{x}{d_0} \dots$	0,00	0,37	0,46	0,55	0,64	0,72	0,81
$\epsilon \dots \dots$	1,000	0,600	0,594	0,582	0,573	0,566	0,560

В последней:

x — расстояние между рассматриваемым сечением и отверстием;

d_0 — диаметр отверстия;

ω_0 — сечение отверстия;

ω — рассматриваемое сечение;

$$\epsilon = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

Пусть при напоре $H = 1,0 \text{ м}$ через отверстие $d = 0,2 \text{ м}$ происходит истечение в атмосферу. Коэффициент расхода для этого напора и взятого отверстия по Базену $\mu = 0,598$.

$$\omega_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 0,0314 \text{ м}^2;$$

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2gH} = 0,598 \cdot 0,0314 \cdot 4,43 = 0,0832 \text{ м}^3/\text{сек} = 83,2 \text{ л/сек}.$$

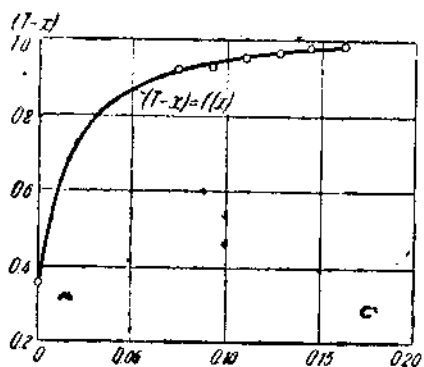
На основании полученных данных составим следующую таблицу:

ТАБЛИЦА 14

$\frac{x}{d_0}$	ε	x	ω	$v = \frac{Q}{\omega}$	v^2	$T = \frac{v^2}{2g}$	$T - x$
0,000	1,000	0,000	0,03140	2,6700	7,0225	0,358	0,358
0,370	0,500	0,074	0,01884	4,4163	19,5006	0,995	0,921
0,460	0,594	0,092	0,01866	4,4610	19,9000	1,014	0,922
0,550	0,582	0,110	0,01827	4,5530	20,7330	1,057	0,947
0,640	0,573	0,128	0,01799	4,6240	21,3900	1,090	0,962
0,720	0,566	0,144	0,01777	4,6800	21,9024	1,116	0,972
0,810	0,560	0,162	0,01758	4,7300	22,3730	1,140	0,978

Вычисления, произведенные в таблице, вполне ясны.

Последний столбец таблицы показывает, что сечение струи по мере удаления от отверстия убывает и что это убывание не происходит пропорционально корню квадратному из напора, а идет значительно быстрее, и так, что если в сечении $x=0$ для создания средней подсчитанной скорости струи достаточен напор в баке 0,358 м, то для сечения $x=0,11$ м необходим напор в баке 0,947 м, а для сечения $x=0,162$ м напор, равный 0,987 м. Иллюстрируем это фиг. 23. Последняя показывает процесс превращения потенциальной энергии в кинетическую на пути следования струн.



Фиг. 23.

Постепенно, по ходу струн, происходит превращение потенциальной энергии в кинетическую, и если в отверстии в его центре гидростатическое давление, по данным Базена, равнялось около 0,59h, где h — напор в баке, то в сечении струи, удаленном на 0,162 м, гидростатическое давление в струе близко к нулю, $\mathcal{E}_{\text{пот}}$ почти целиком обратилась в $\mathcal{E}_{\text{кин}}$, и движение струн стало почти свободным. Вследствие потерь энергии кривая $(T-x)=f(x)$ все же не достигнет величины $(T-x)=1,0$ по фиг. 23.

Коэффициент реактивности для отверстий с острыми гранями весьма высок.

Преобразование $\mathcal{E}_{\text{пот}}$ в $\mathcal{E}_{\text{кин}}$ здесь происходит значительно быстрее, нежели на водосливах.

22. Второй существенный недостаток современных методов построения профиля водосливной плотины

Выше мы установили, что при $P = \text{const}$ всякая частица жидкости внутри толщи струи или на ее поверхностях; начиная от сечения в вершине парабола, должна описать при своем движении эквидистантную кривую к любой

другой частице жидкости и что вследствие этого внесение в расчет центра тяжести не только излишне, но оно, может быть, даже нарушает основную предпосылку уравнения осевой параболы — постоянства v_0 или v_x .

Исследуем влияние положения центра тяжести на форму профиля верхней

и нижней поверхностей струи. Вводится центр тяжести в расчет по тем соображениям, что по отношению к нему происходит сжатие струи по сечению, нормальному к вектору абсолютной скорости. Введением его в расчет как бы увеличивается площадь нижнего профиля по отношению к площади профиля осевой параболы. Нижняя параболка как бы спрямляется под влиянием центра тяжести.

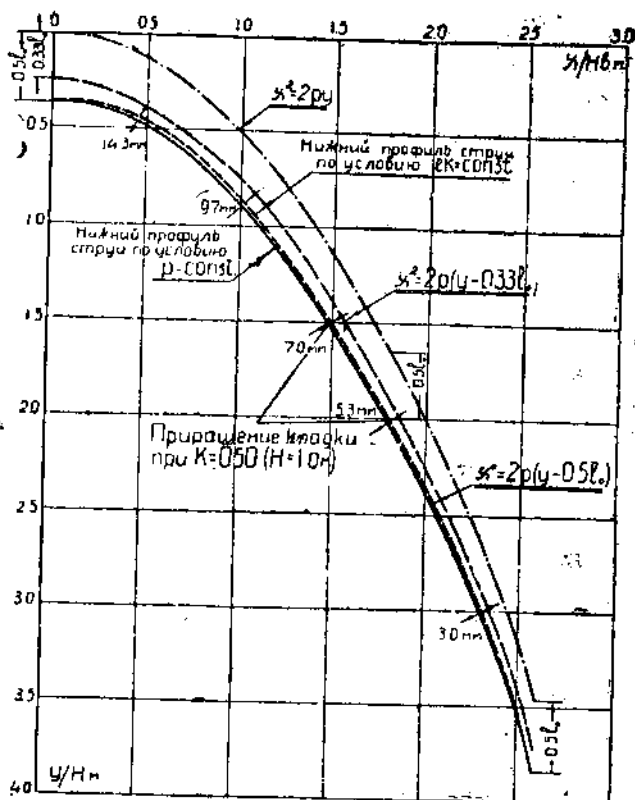
Для установления влияния расположения центра тяжести в толще струи нами сделаны подсчеты профиля нижней поверхности струи при уравнении осевой параболы $x^2 = 2,044 y$. Центр тяжести в первом случае взят при $k = 0,33$, т. е. на $1/3$ толщины струи от нижней поверхности, во втором — при $k = 0,43$ и в третьем — при $k = 0,5$. При графическом определении координат нижнего профиля струи (по чертежу для $H = 1,0$ м при масштабе чертежа 1:10) разница от смещения центра тяжести от $k = 0,33$ до $k = 0,5$ не ощущается. Она становится ощутимой лишь при аналитическом способе ее определения.

Итак, пусть уравнение осевой параболы имеет вид:

$$x^2 = 2,044 y. \text{ Тогда } p = \frac{2v_0^2}{g} = 2,044,$$

$$v_0^2 = 10,02582 \text{ и } v_0 = 3,1664 \text{ м/сек; } P = \frac{p}{2} = 1,022.$$

Вершину осевой параболы поместим в „суженном“ сечении струи, т. е. там, где толщина струи, измеренная по вертикали, по Базену равна



Фиг. 24.

$e_x = e_0 = 0,75 H$, или просто $0,75 m$. Начало координат совместим с вершиной осевой параболы. Тогда согласно фиг. 24 уравнения эквидистантных парабол, т. е. парабол, смещенных по вертикали вниз: первая на $0,33e_0$, вторая — на $0,43e_0$ и третья — на $0,5e_0$, должны представить нижний профиль струи, поскольку $p = \text{const}$. Уравнения этих парабол нижнего профиля будут:

- 1) $x^2 = 2P(y - 0,33e_0) = 2,044(y - 0,2475)$;
- 2) $x^2 = 2P(y - 0,43e_0) = 2,044(y - 0,3225)$;
- 3) $x^2 = 2P(y - 0,5e_0) = 2,044(y - 0,3750)$.

Возьмем теперь на осевой параболе $x^2 = 2,044 y$ ряд точек, для которых подсчитаем величины абсолютных скоростей по формуле $v_{abc} = \sqrt{v_0^2 + 2gy}$. Подсчитываем далее толщины струи, измеряемые по нормали к абсолютной скорости, $e = \frac{Q}{v_{abc}}$ и отрезки величины e , равные $0,5e$; $0,43e$ и $0,33e$.

Тогда мы получаем таблицу 15, позволяющую графически определить координаты нижнего профиля струи из условия „центра тяжести“.

ТАБЛИЦА 15

№ по пор.	Координаты точек		$v_{abc} =$ $= \sqrt{v_0^2 + 2gy}$	$e = \frac{Q}{v_{abc}}$	$0,5e$	$0,43e$	$0,33e$
	x	y					
1	0,00	0,00000	3,16640	0,75000	0,37500	0,32250	0,24750
2	0,25	0,03058	3,25970	0,72800	0,36425	0,31325	0,24040
3	0,50	0,12230	3,52500	0,67380	0,3369	0,28973	0,22235
4	0,75	0,27520	3,92750	0,60466	0,30233	0,25000	0,19954
5	1,00	0,49330	4,43010	0,53003	0,26801	0,23019	0,17689
6	1,25	0,76440	5,00200	0,47475	0,23737	0,20414	0,15667
7	1,50	1,10100	5,62390	0,42220	0,21110	0,18155	0,13926
8	1,75	1,49800	6,27910	0,37826	0,18913	0,16265	0,12483
9	2,00	1,95700	6,95860	0,34127	0,17064	0,14675	0,11262
10	2,50	3,05770	8,36790	0,28380	0,14190	0,12203	0,09365
11	3,00	4,40300	9,81900	0,24185	0,12093	0,10400	0,07981
12	3,25	5,16756	10,50775	0,22601	0,11300	0,09718	0,07468

Откладывая по нормальям из соответствующих точек торезки, равные $0,5e$, мы получим профиль нижней поверхности струи по условию $k = 0,5$. Откладывая подобным же образом отрезки, $0,43e$ получим нижний профиль по условию $k = 0,43$, а откладывая $0,33e$, получим профиль при $k = 0,33$.

Если продолжить те же нормали до пересечения с эквидистантными параболками:

$$\begin{aligned} x^2 &= 2,044(y - 0,2475) \text{ при } (k = 0,33); \\ x^2 &= 2,044(y - 0,3225) \text{ „ } (k = 0,43); \\ x^2 &= 2,044(y - 0,3750) \text{ „ } (k = 0,50), \end{aligned}$$

то отрезки нормалей между осевой и одной из трех эквидистантных парабол уже не дадут величины $0,5e$, или $0,43e$, или, наконец, $0,33e$, а несколько иные величины, а именно: $0,5e_1$; $0,43e_1$ и $0,33e_1$.

Величины этих отрезков мы теперь и определим.

ТАБЛИЦА 16

№ нормы	1		2		3		4		5		6	
	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у
Координаты осевой параболы	0,00000	0,00000	0,25000	0,03058	0,50000	0,12230	0,75000	0,27520	1,00000	0,48930	1,25000	0,76440
Координаты точек пересечения нормалей с параболой при $k = 0,50$	0,00000	0,37500	0,16259	0,33784	0,34748	0,43400	0,56319	0,53017	0,80309	0,69055	1,05727	0,92200
То же с параболой при $k = 0,43$	0,03000	0,32250	0,17463	0,33862	0,36940	0,38925	0,59043	0,49305	0,83191	0,66110	1,08547	0,89894
То же с параболой при $k = 0,33$	0,00000	0,24450	0,19230	0,26157	0,40038	0,32593	0,62871	0,44089	0,87233	0,61979	1,12495	0,86600

№ нормы	7		8		9		10		11		12	
	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у
Координаты осевой параболы	1,50000	1,01000	1,75000	1,49800	2,00000	1,95700	2,50000	3,03770	3,00030	4,40300	3,25000	5,16756
Координаты точек пересечения нормалей с параболой при $k = 0,50$	1,31807	1,22436	1,58043	1,59703	1,84320	2,03712	2,36557	3,11273	2,88347	4,44270	3,14102	5,20177
То же с параболой при $k = 0,43$	1,34453	1,20693	1,60433	1,58273	1,86578	2,02553	2,38460	3,10496	2,90003	4,44047	3,15649	5,19617
То же с параболой при $k = 0,33$	1,38175	1,18157	1,63347	1,56255	1,89766	2,03929	2,41200	3,09375	2,92354	4,42905	3,17845	5,19005

Уравнение нормали в общем виде:

$$(x - x_1) = -\frac{x_1}{p} (y - y_1).$$

Для взятых же двенадцати точек на осевой параболе нормали будут иметь вид:

Для точки $I(0,0; 0,0)$: $(x - 0) = -\frac{0}{1,022} (y - 0)$, или $x = 0$:

" " 2 (0,25; 0,3058); после преобразования:

$$x + 0,24462y - 0,25748 = 0$$

" " 3 (0,50; 0,12230): $x + 0,48924y - 0,55983 = 0$

" " 4 (0,75; 0,27520): $x + 0,73385y - 0,95226 = 0$

" " 5 (1,00; 0,48930): $x + 0,97847y - 1,47877 = 0$

" " 6 (1,25; 0,76440): $x + 1,22309y - 2,18493 = 0$

" " 7 (1,50; 1,10100): $x + 1,46771y - 3,11595 = 0$

" " 8 (1,75; 1,49800): $x + 1,71233y - 4,31507 = 0$

" " 9 (2,00; 1,95700): $x + 1,95694y - 5,82973 = 0$

" " 10 (2,50; 3,05770): $x + 2,44618y - 9,98042 = 0$

" " 11 (3,00; 4,40300): $x + 2,93542y - 15,92465 = 0$

" " 12 (3,25; 5,16756): $x + 3,18005y - 19,68330 = 0$

Найдем теперь точки пересечения этих двенадцати нормалей к осевой параболе с эквидистантными тремя параболками; координаты этих точек пересечения приведены в таблице 16. Получены они из совместных решений уравнения эквидистантной параболы и уравнения нормали.

По полученным точкам пересечения нормальными эквидистантных парабол определяем расстояние между точками осевой параболы и точками на параболах эквидистантных. Эти отрезки нормалей выразятся в общем виде формулой:

$$e_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

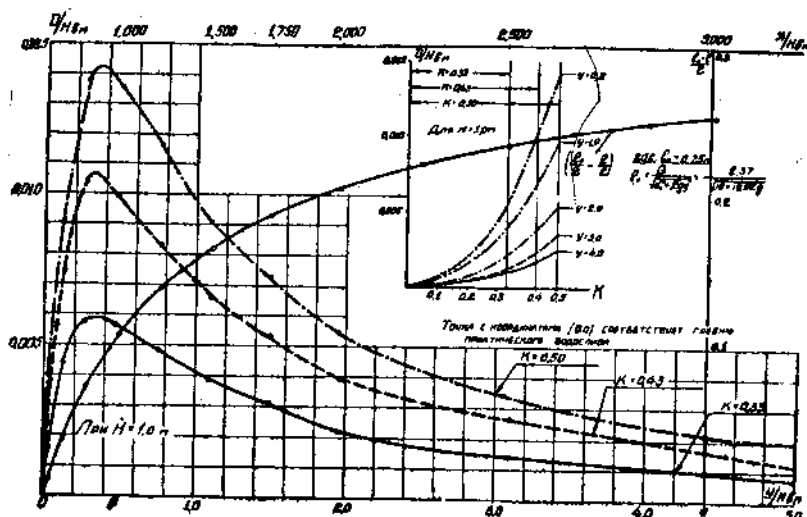
и в данном случае для наших двенадцати точек приводятся в таблице 17.

ТАБЛИЦА 17

Точки осевой параболы	0,5 e_1	0,43 e_1	0,33 e_1
1 (0,00000; 0,00000)	0,37500	0,32250	0,24750
2 (0,25000; 0,03058)	0,36779	0,31713	0,24192
3 (0,50000; 0,12230)	0,34590	0,29720	0,22670
4 (0,75000; 0,27520)	0,31608	0,27040	0,20530
5 (1,00000; 0,48930)	0,28155	0,24033	0,18255
6 (1,25000; 0,76440)	0,24897	0,21250	0,16150
7 (1,50000; 1,01000)	0,22015	0,18810	0,14310
8 (1,75000; 1,49800)	0,19640	0,16800	0,12800
9 (2,00000; 3,05770)	0,17608	0,15070	0,11480
10 (2,50000; 3,05770)	0,14525	0,12469	0,09509
11 (3,00000; 4,40300)	0,12310	0,11677	0,08080
12 (3,25000; 5,16756)	0,11422	0,09803	0,07499

Отрезок $0,5e_1$ представляет расстояние от осевой параболы, измеряемое по нормали к ней до точки пересечения нормали с эквидистантной параболой $x^2=2,044(y-0,5e_0)$. Величина $0,43e_1$ соответствует отрезку нормали от осевой параболы до параболы $x^2=2,044(y-0,43e_0)$ и, наконец, отрезок $0,33e_1$ — расстоянию до параболы $x^2=2,044(y-0,33e_0)$.

Разность между величинами e_1 и e представит нам те изменения в ниж-



Фиг. 25.

нем профиле струи, которые вносятся от введения в расчет центра тяжести на нормали. Эти разности мы представляем таблицей 18.

ТАБЛИЦА 18

№ точки	Координаты точек на осевой параболы		$D_{0,50} = 0,50 e_1 - 0,50 e_1$	$D_{0,43} = 0,43 e_1 - 0,43 e$	$D_{0,33} = 0,33 e_1 - 0,33 e$
	x	y			
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,25000	0,03053	0,00354	0,00388	0,00152
3	0,50000	0,12230	0,00900	0,00747	0,00435
4	0,75000	0,27520	0,01375	0,01040	0,00576
5	1,00000	0,48930	0,01354	0,00984	0,00567
6	1,25000	0,76440	0,01160	0,00838	0,00483
7	1,50000	1,10100	0,00905	0,00655	0,00384
8	1,75000	1,49800	0,00727	0,00535	0,00317
9	2,00000	1,95700	0,00544	0,00395	0,00218
10	2,50000	3,05270	0,00345	0,00266	0,00144
11	3,00000	4,40300	0,00213	0,00117	0,00099
12	3,25000	5,16756	0,00122	0,00085	0,00014

На фиг. 25 изображены данные последней таблицы. Именно, на ней представлены кривые: $D_{0,50}$, $D_{0,43}$ и $D_{0,33}$ в зависимости от координат

осевой параболы (для напора $H=1,0$ м) и обозначены: первая — через $k=0,50$; вторая — через $k=0,43$ и третья — через $k=0,33$.

Из этих кривых явствует, что профиль нижней поверхности струи, эквидистантный профилю осевой параболы по условию $p=\text{const}$, претерпевает увеличение сечения от введения в расчет центра тяжести, располагающегося на определенной части толщины струи e_{abc} . Но этот прирост сечения происходит неравномерно по поверхности эквидистантного профиля, именно он, хотя бы для случая при $k=0,50$, равен нулю на гребне практического водослива, т. е. в точке 1 (0,0) по фиг. 24, достигает максимума 0,0143 м на участке между точками 4 и 5, т. е. между $x=0,75$ и $x=1,0$ или между $y=0,27520$ и $y=0,48930$, и далее прирост значительно убывает.

Фиг. 24 наглядно показывает этот ход приращения профиля от введения в расчет центра тяжести на нормали.

Действительное изменение толщины струи ни в коей мере не отвечает такому распределению материала на теле плотины и характеризуется нами

кривой $(\frac{e_0}{2} - \frac{e}{2})$ на фиг. 25. Как видно из кривой $(\frac{e_0}{2} - \frac{e}{2})$, приращение сечения эквидистантного профиля должно быть плавным, постепенным и все увеличивающимся; этого, однако, не создает введение в расчет центра тяжести на нормали.

Приведем еще один пример. Пусть осевая парабола имеет уравнение $x^2=1,8y$. Тогда $p=\frac{2v_0^2}{g}=1,8$; $v_0^2=8,829$; $v_0=2,9713$; $P=\frac{p}{2}=0,9$; $Q=v_0 e_0=2,9713 \cdot 0,75=2,228475$.

Уравнения эквидистантных парабол запишутся для случаев $k=0,33$ и $k=0,50$:

$$\begin{aligned} & \text{и} \quad x^2=1,8(y-0,33 \cdot 0,75)=1,8(y-0,2475) \\ & \quad x^2=1,8(y-0,50 \cdot 0,75)=1,8(y-0,3750). \end{aligned}$$

Возьмем теперь на осевой парболе ряд точек и подсчитаем соответствующие толщины струи и отрезки нормали 0,5 e и 0,33 e . Результаты вычислений приводим в таблице 19.

ТАБЛИЦА 19

№ точки	Координаты		$\sqrt{2gy}$	v_0^2+2gy	$v^2 = \sqrt{v_0^2+2gy}$	$e = \frac{Q}{P^2}$	0,5 e	0,33 e
	x	y						
1	0,00	0,00000	0,00000	8,82900	2,97130	0,75000	0,37500	0,24750
2	0,25	0,03472	0,68121	9,51021	3,08386	0,72262	0,36131	0,23847
3	0,50	0,13889	2,72502	11,55402	3,39912	0,65560	0,32780	0,21635
4	0,75	0,31250	6,13125	14,96025	3,86785	0,57615	0,28808	0,19013
5	1,00	0,55556	10,90009	19,72909	4,44164	0,50172	0,25086	0,16557
6	2,00	2,22222	43,59996	52,42896	7,24078	0,30777	0,15389	0,10156
7	3,00	5,00000	48,10000	106,92900	10,34065	0,21551	0,10775	0,07112

Построив осевую параболу и отложив в соответствующих точках по нормали отрезки $0,5e$ и $0,33e$, мы получим точки, принадлежащие параболам по условию „центр тяжести на нормали“.

Уравнения нормалей для осевой параболы в семи точках ее будут:

$$\begin{aligned} 1) x &= 0; & 5) x + 1,11111y - 1,61729 &= 0; \\ 2) x + 0,27778y - 0,25964 &= 0; & 6) x + 2,22222y - 6,93826 &= 0; \\ 3) x + 0,55556y - 0,57716 &= 0; & 7) x + 3,33333y - 19,66665 &= 0. \\ 4) x + 0,83333y - 1,01042 &= 0; \end{aligned}$$

Точки пересечения этих нормалей с эквидистантными параболами будут по таблице 20.

ТАБЛИЦА 20

№ точки		1	2	3	4	5	6	7
Координаты точек осевой параболы	x	0,00000	0,25000	0,50000	0,75000	1,00000	2,00000	3,00000
	y	0,00000	0,03472	0,13889	0,31250	0,55556	2,22222	5,00000
Координаты точек пересечения с параболой $k=0,50$	x	0,00000	0,15191	0,33433	0,55520	0,80279	1,85532	2,89510
	y	0,37500	0,38782	0,43709	0,54627	0,73305	2,28732	5,03147
С параболой $k=0,33$	x	0,00000	0,18558	0,39219	0,62394	0,87243	1,90553	2,93115
	y	0,24750	0,26661	0,33294	0,46378	0,67037	2,26474	5,02065

Длины нормалей до эквидистантных парабол будут по таблице 21.

ТАБЛИЦА 21

Точки осевой параболы	1	2	3	4	5	6	7	Обозначения
Длина нормали до параболы $k=0,5$	0,37500	0,36647	0,34113	0,30429	0,26551	0,15865	0,10951	0,5 e
То же до $k=0,33$	0,24750	0,24067	0,22199	0,197875	0,17163	0,10360	0,07188	0,33 e

Величины $D_{0,50}$ и $D_{0,33}$ тогда будут согласно таблице 22:

ТАБЛИЦА 22

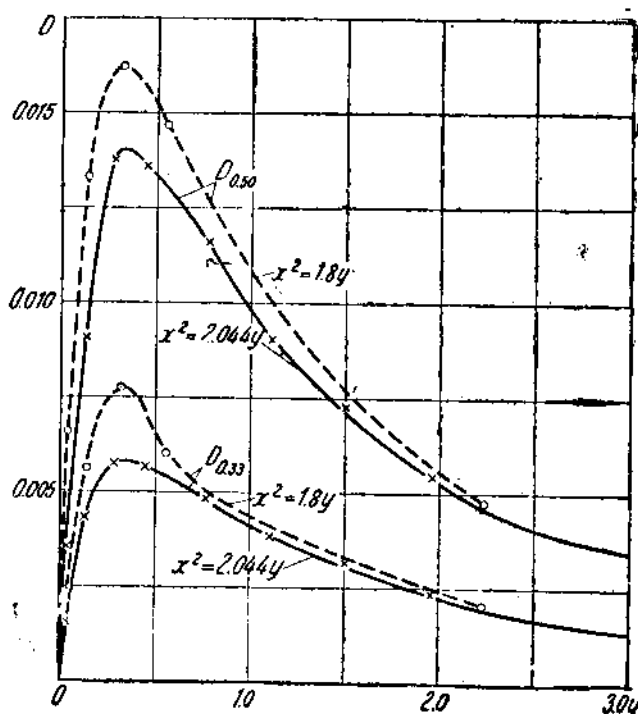
№ точки	Координаты		$D_{0,50} = 0,5 e_1 - 0,5 e$	$D_{0,33} = 0,33 e_1 - 0,33 e$	Для параболы $\lambda^2 = 2,044 y$	
	x	y			$D_{0,50}$	$D_{0,33}$
1	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,25	0,03472	0,00516	0,00220	0,00354	0,0012
3	0,50	0,13889	0,01333	0,00564	0,00900	0,00435
4	0,75	0,31250	0,01622	0,00775	0,01375	0,00576
5	1,00	0,55556	0,01465	0,00606	0,01354	0,00567
6	2,00	2,22222	0,00477	0,00204	0,00544	0,00218
7	3,00	5,00000	0,00176	0,00076	0,00213	0,00090

Для тех же значений x

Последняя таблица еще раз подтверждает все вышеизложенные кривые. $D_{0,50}$ и $D_{0,3} = f(y)$ представлены на фиг. 26. На той же фиг. 26 для сравнения представлены те же кривые по уравнению осевой параболы $x^2 = 2,044y$.

На фиг. 25 вверху справа представлены кривые $D = f(k)$ для ординат осевого профиля $y = 0,2$; $y = 1,0$ до $y = 4,0$.

Ход кривых $\frac{D}{H}$ или в нашем случае при $H = 1,0$ м просто D , очевидно, не столько зависит от толщины струи, измеряемой по нормали к осевой параболе,



Фиг. 26.

сколько от радиуса кривизны осевой параболы. Чем меньше параметр p осевой параболы, тем больше должно быть искажение профиля нижней струйки, или, иначе, чем меньше радиус кривизны осевой параболы в верхней части, тем больше искажение. Чем выше мы располагаем центр тяжести, тем большие деформации претерпевает нижний профиль (фиг. 24), тем больше его искажение.

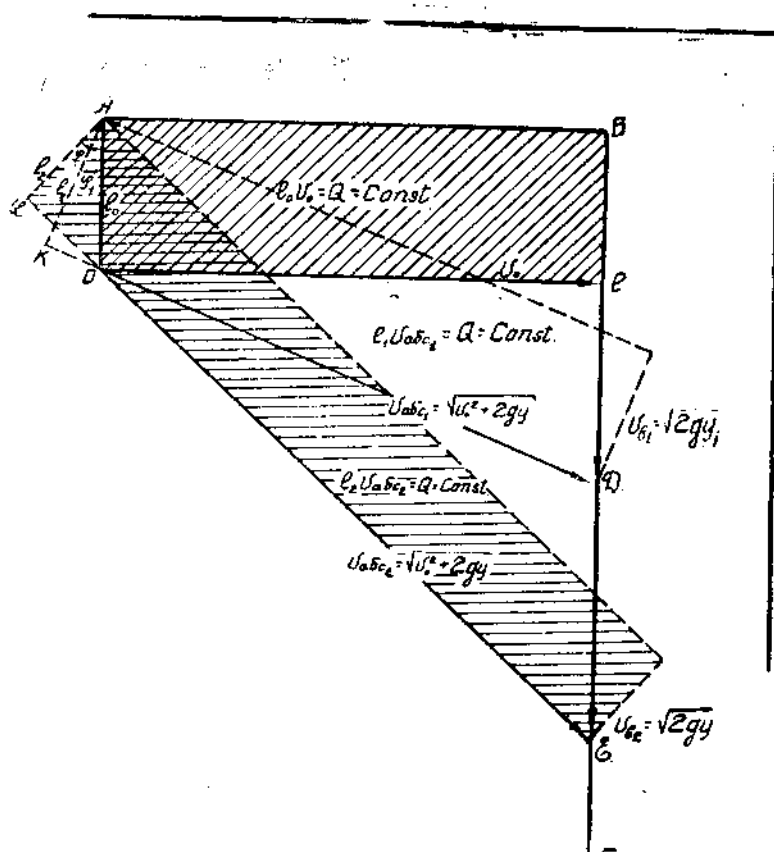
Профиль нижней поверхности струи, „при условии центр тяжести на нормали“, не будет уже эквидистантным профилю осевой параболы. Расстояние между этими профилями будет меняться от величины ke_0 к величине, меньшей

ke_0 на участке $Q \leq y \leq 0,4$; далее оно будет снова возрастать, асимптотически, приближаясь к величине ke_0 .

Так как при этих изменениях нижнего профиля верхний профиль струи, как то явствовало из наших предыдущих доказательств, которые здесь полным еще фиг. 27, будет все же эквидистантным нижнему (поскольку $p = \text{const}$), он претерпит те же изменения, что и нижний профиль, и отрезок ke_0 , т. е. расстояние по вертикали от верхнего профиля струи до осевой параболы, будет, при учете центра тяжести, изменяться от величины ke_0 к минимуму при $y = 0,4$ и далее будет возрастать, не доходя все же до значения ke_0 . Средняя горизонтальная составляющая скорости части струи под осевой параболой должна будет в таком случае вначале, до $y = 0,4$, возрастать, затем убывать, приближаясь к величине v_x . Та же средняя горизонтальная

составляющая скорости части струи над осевой параболой должна претерпевать противоположные изменения, именно: она должна будет вначале убывать на участке до значения $y=0,4$, а затем возрастать, приближаясь к v_{0x} .

Таким образом введение в расчет "центра тяжести на нормали" противоречит условию $p=\text{const}$; оно ухудшает профиль нижней поверхности, изламывая его и со-



Фиг. 27.

здавая благоприятные условия для возникновения вакуума за участком с максимумом нароста кладки т. е. на участке при $y > 0,4$, что в старой системе осей координат означает на участке за $y > 0,4 + 0,281 = 0,681$. Центр тяжести на нормали противоречит и данным опытов Шимеми (фиг. 5). Введение его и расчет в таком виде составляет вторую и существеннейшую ошибку методов построения профиля.

При описании экспериментальных работ по профилю в ГЭИ мы покажем, что, чем меньше параметр P осевой параболы, чем выше располагается центр тяжести, тем значительнее мы нарушаем естественные радиусы кри-

визны нижнего профиля струи (значительно уменьшая их при значении $y=0,4$) тем более вероятен вакуум на профиле и тем большей величины.

Центр тяжести надлежит изолировать от связи его с радиусами кривизны осевой параболы. В настоящем же виде действительный характер изменения толщины струи ни в коей мере не может быть отображен кривыми $D=f(x;y)$.

23. Третий недостаток методов

Кроме указанных двух существеннейших недостатков современных методов теоретического построения профиля водослива ($P=\text{const}$ и центр тяжести на нормали) всем методам свойственен и следующий третий недостаток: профиль верхней поверхности струи при любом положении вершины осевой параболы (от $k=0$ до $k=1$) претерпевает разрыв, ибо его элемент над вершиной осевой параболы непременно получается горизонтальным вместо наклонного под некоторым углом к горизонту.

В случае, если вершина осевой параболы располагается до „суженного сечения“ (фиг. 1), то разрыв или излом претерпевает и нижний профиль струи, так как в вершине осевой параболы вертикальная составляющая скорости принимается равной нулю.

Помимо перечисленных отдельные методы построения содержат ряд других более или менее существенных недостатков.

24. Недостатки построения профиля по Кригеру

Коррективы в кригеровские таблицы координат профиля

Выкладкам Кригера свойственны все три указанных выше недостатка, и в силу этого данную им фиг. 7 нельзя считать в какой-либо мере истинно отображающей существо явления перелива струи; $v_h \neq \text{const}$. В силу тех же причин уравнение $x'^2 = 2,732 y'$ почти на всей экспериментальной части профиля (участок $0 < x < 1,5$) не дает точек совпадения.

В таблице II (в конце текста) графы 1 и 2 представляют координаты профиля струи по таблице Кригера, в графе 3 — ординаты того же профиля по уравнению. Только в точке $x=1,2$, как видно, данные экспериментов совпадают с данными уравнения. В верховой части профиля уравнение $x'^2 = 2,732 y'$ не применимо.

При построении профиля по уравнению, переход на новое начало координат (точка 0 фиг. 7) оказалось возможным произвести только при зависимостях

$$\begin{aligned} x &= x' + 0,063 = x' - b; \\ v &= y' - 0,063 = y' - a, \end{aligned}$$

каковые дают непосредственно координаты нижнего профиля струи (графа 3 таблицы II). Эти зависимости и были приняты нами. Центр тяжести, для большего совпадения с имеющимися координатами Кригера, не принят во внимание при вычислении координат.

Графа 4 таблицы II содержит установленные нами координаты нижнего профиля струи на основании анализа кригеровского материала. В экспериментальной части профиля ($0 < x < 1,5$) таблица Кригера нами пополнена данными интерполяции; в части профиля при $x > 1,5$ координаты подсчитаны по уравнению с переходом на нижний профиль по установленным

нами зависимостям и без принятия в расчет центра тяжести. Графа 4 выправляет недостатки данных Кригера в размерах, согласно графе 5 той же таблицы и фиг. 28 (1). В точках $x=2,5$ и $x=3,0$ у Кригера имеются явные ошибки.

Поскольку кригеровские экспериментальные точки профиля струи (в интервале $0 < x < 1,5$) в нашей таблице сохранены, поскольку при $x > 1,5$ согласно экспериментальным данным Шимеми, струя едва ли увеличивает скорость v_x , и поскольку получившееся сопряжение экспериментальной части, профиля с аналитической плавное, можно рекомендовать пользование выправленными нами координатами профиля нижней поверхности струи.

В графе 6 таблицы II даны ординаты профиля кладки по Кригеру. Из сопоставления этих ординат с ординатами нижней поверхности струи (графа 4) устанавливается степень деформации профиля струи под влиянием кладки (графа 7). Из сопоставления же цифр этой графы устанавливается, что Кригером изменение профиля струи произведено недостаточно плавно. Придерживаясь его координат, имеется возможность значительно сгладить профиль и тем устранить повод к образованию местных вакуумных участков.

При представлении на чертеже кривой $D = f(x)$, здесь $D = \text{Укладки} - \text{Уструи}$ нетрудно установить, что она близка к параболе и для ее точек можно написать в общем виде уравнение:

$$Ax^n = D.$$

Для определения степени этого уравнения можно воспользоваться соотношением:

$$\frac{Ax_2^n}{Ax_1^n} = \frac{D_2}{D_1},$$

которое для точек при $x=4$ и $x=3,5$ даст:

$$\frac{(4-0,3)^n}{(3,5-0,3)^n} = \frac{0,680}{0,441} = \left(\frac{3,7}{3,2}\right)^n = 1,156^n = 1,542,$$

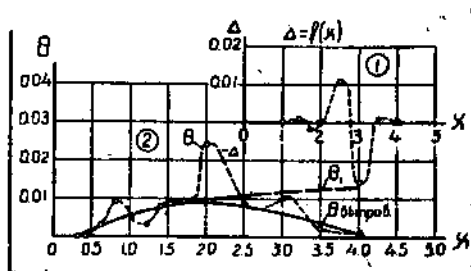
откуда $n \approx 3,0$.

Из абсцисс 4 и 3,5 здесь вычтено 0,3 потому, что вершина параболы $Ax^n = D$ располагается на гребне водослива. Стало быть,

$$\left(\frac{x_2}{x_1}\right)^3 = \frac{D_2}{D_1} \text{ или } D_1 = \frac{D_2}{x_1^3} x_1^3.$$

Для точки $x_2 = (4-0,3) = 3,7$; $D_2 = 0,680$, и тогда в общем виде

$$D_1 = \frac{0,680}{3,7^3} x_1^3 \text{ или } D_1 = 0,0134 x_1^3.$$



Фиг. 28.

Величина D_1 , представляющая математически выраженную степень изменения профиля струи кладкой, подсчитана нами (графы 8 и 9) и дана в графе 10 таблицы II. Наложив на профиль струи (графа 4) кривую $D_1 = 0,0134x_1^3$, мы получаем координаты кладки по Кригеру с некоторыми отступлениями в ряде точек.

Эти отступления представлены графой 11 и кривой 2 фиг. 28. Они не представляют закономерности, и кривая $\theta = f(x)$ выправлена нами, а разности по кривой $\theta_{\text{кгр}} = f(x)$ введены в окончательные значения ординат профиля кладки (графа 13). Как видно, кригеровские координаты кладки не представляли плавной кривой и только после исправлений могут быть рекомендованы для пользования.

Разность между ординатами кладки принятого профиля и профиля кладки по Кригеру представлена графой 15. Нетрудно видеть из всего изложенного, что исправление в координатах Кригера и расширение их поведут к улучшению качества профиля.

Хотя кригеровское обоснование профиля ни в коем случае не может быть признано удовлетворительным, тем не менее его координаты нижнего профиля струи по введению наших исправлений представляют из всего наилучший и наиболее полный материал для построения профиля водосливной плотины. Эту уверенность подкрепляют следующие обстоятельства:

- 1) профиль струи по Кригеру в границах $0 < x < 1,5$ получен экспериментально на крупном водосливе;
- 2) профиль струи по Кригеру на всем протяжении равномерно и плавно облегает профиль струи по Шимеми (фиг. 16);
- 3) участок профиля, построенный по уравнению, плавно сопрягается с экспериментальным;
- 4) уравнение конца слива $x^{1/2} = 2,732u'$ имеет весьма большой параметр;
- 5) нет данных для предположения возможности роста u_x при $x > 1,5$.

Профиль кладки по Кригеру плавно огибает профиль струи по Кригеру, он образован наложением на профиль струи параболической кривой $D_1 = 0,0134 x_1^3$ и кривой $\theta_{\text{кгр}} = f(x)$ по фиг. 28. Его радиусы кривизны

$$\rho_{\text{кл}} > \rho_{\text{стр}} \text{ и кривая } (\rho_{\text{кл}} - \rho_{\text{стр}}) = f(x, v)$$

представляют плавно возрастающую кривую. По данным испытаний в лаборатории в разнообразных условиях профиль кладки оказался безвакуумным.

Имеется возможность несколько уменьшить сечение профиля кладки и, главным образом, за счет снижения вспученности кривой $\theta_{\text{кгр}} = f(x)$. Это, однако, потребует экспериментальной проверки.

Для невысоких плотин и там, где требуется, по условиям негидравлического порядка, значительно большее сечение профиля, увеличение сечения желательно производить изменением направления правой ветви кривой $\theta_{\text{кгр}}$ (фиг. 28). В этом случае правая ветвь должна занять положение, подобное положению θ_1 .

Профиль кладки по Кригеру, в его исправленном виде, мы рекомендуем для практического применения как профиль безвакуумный.

За ограниченностью области измерений не может найти практического применения профиль Базена. За малостью масштаба исследований не может быть рекомендован для практики профиль Шимеми. Не может быть рекомендован для практики профиль ГЭИ — 2ЛЦ вследствие недостаточного изуче-

ния его в лабораторных условиях. Не могут быть рекомендованы профили Сабаньева и Ребокса, как профили вакуумные.

Профиль Казанской не может найти применения как профиль вакуумный вследствие наличия трех основных и ряда второстепенных недостатков, к числу коих могут быть отнесены: неопределенность в положении вершины осевой параболы, неопределенность в величине v_x , невозможность построения верховой части профиля.

Профиль Бовина вакуумный в силу наличия трех основных недостатков его теории. Неизвестно в этом методе и основание неполного использования экспериментальных данных Базена.

Профиль Пузыревского при $\beta = 0,1$ будет, можно сказать с полной уверенностью, вакуумным. Все недостатки свойственны этому профилю. Уравнение Пузыревского, учитывая силу прижима, упускает существо явления — наличие возрастающей скорости.

Павловым необоснованно и неправильно принято положение центра тяжести на половине толщины струи.

Профили Людина, Моррисона и Броди, АКД, Мюллера и Дейша также должны быть профилями вакуумными в силу указанных выше причин.

25. Заключение

Изложенное выше, по нашему мнению, позволяет сделать следующие выводы:

1. Наличие значительного количества экспериментальных данных и теоретических выводов, касающихся вопроса о форме профиля водосливной плотины, затрудняет выбор рационального профиля данной установки.

Затруднения в выборе проявляются, с одной стороны, вследствие отсутствия взаимной увязки между требованиями, предъявляемыми к гидравлическому профилю водослива (требования на устойчивость и прочность, на безвакуумность, на максимум коэффициента расхода и на минимум сечения), а с другой — вследствие широты диапазона возможных решений задачи о построении профиля, предоставляемых различными исследователями.

Разнообразие в возможных решениях задачи, неувязки в требованиях, предоставляемых к профилю, принуждают проектировщика и строителя, по израсходовании значительного времени на литературную работу, обращаться в гидравлическую лабораторию для разрешения задачи экспериментальным путем.

Обобщение, систематизация и критика теоретических и экспериментальных материалов, касающихся вопроса о профиле, являются поэтому необходимыми и в смысле экономии времени и средств и в смысле гарантии за правильность решения каждой частной задачи.

2. Помимо требования на устойчивость и прочность водосливной плотины — требования не гидравлического порядка, основным до настоящего времени считается требование на безвакуумность, вне зависимости от площади профиля и от его коэффициента расхода. Рациональным профилем считается тот безвакуумный профиль, который при минимуме сечения дает максимальный коэффициент расхода; требование на безвакуумность в значительном числе случаев вызывает возрастание сечения профиля против того, которое требуется по условию устойчивости и прочности.

3. Вакуум на водосливе вызывает коррозию его тела, вибрацию сооружения и добавочные взвешивающие или опрокидывающие плотину силы или и те и другие вместе. Вакуум вместе с тем при определенном очертании гребня водослива может более или менее поднять коэффициент расхода но, по всей вероятности, не в той мере, что дают Ребокк и Крамер. Лишь вследствие неизученности проявлений вакуума, несмотря на ожидающееся повышение коэффициента расхода и экономию кладки, требование на безвакуумность не снимается с повестки дня.

4. Теоретически профилем безвакуумным при минимуме сечения и при максимуме коэффициента расхода будет тот профиль, который образуется нижней поверхностью струи, переливающейся через водослив Базена, если на эту нижнюю поверхность струи действует только атмосферное давление. Если контур кладки будет располагаться внутри контура переливающейся через базеновский водослив струи, мы, очевидно, будем иметь вакуумный профиль водослива; если этот контур кладки будет полнее контура нижней поверхности струи, мы получим профиль с пониженным коэффициентом расхода. Только контур кладки, совпадающий с контуром нижней поверхности переливающейся струи, будет безвакуумным (с нулевым давлением струи) при минимуме сечения и будет обладать наибольшим коэффициентом расхода.

Практически, однако, контур кладки должен быть взят несколько полнее контура нижней поверхности струи. При этом за счет некоторого снижения коэффициента расхода достигается избыточное над атмосферным давление струи на кладку, как гарантия за безвакуумность.

Профиль более полный, чем профиль нижней поверхности струи, будет безвакуумным все же только при вполне определенных условиях, именно только в том случае, когда кривая

$$(\rho_{кл} - \rho_{стр}) = f(x; y)$$

представляет кривую, плавно возрастающую. Здесь $\rho_{кл}$ — радиусы кривизны профиля кладки; $\rho_{стр}$ — радиусы кривизны нижнего профиля струи; x и y — соответствующие координаты профиля струи и кладки.

Применение очертания верховой части профиля по дугам окружности, при сохранении безвакуумности, не может повести к росту коэффициента расхода профиля.

5. Для практических целей вполне оправдываемо пользование единственным единичным профилем, к каковому сводят результаты своих исследований Базен, Шимеми, Кригер и авторы аналитических методов построения профиля (независимо от высоты плотины w).

6. Анализ аналитических методов решения задачи о профиле и сопоставление этих решений с результатами экспериментальных исследований обнаруживают, что аналитические методы дают профили преуменьшенного сечения, хотя они в большей части основаны на чрезмерно высоких, нереальных коэффициентах расхода.

7. Основной и единственной причиной указанного несоответствия является то обстоятельство, что горизонтальная составляющая средней скорости переливающейся струи не остается постоянной, как считали авторы аналитических методов, а, как показал наш анализ экспериментальных данных Ребокка, Коха, Базена и Шимеми, эта средняя скорость возрастает и в весьма значительной мере. Вместе с возрастанием горизонтальной составляющей

средней скорости переливающейся струи v_x , вертикальная составляющая средней скорости v_y остается всегда несколько меньшей, нежели $\sqrt{2gy}$, если y — высота падения. По этой причине аналитические методы решения дают профили, западающие под экспериментальные.

8. По той причине, что скорость v_x возрастает, а v_y остается всегда меньше $\sqrt{2gy}$, уравнение движения центра тяжести секундного расхода не может быть записано в виде уравнения $x^2 = px$; оно должно быть не ниже третьей степени.

9. Вторым существенным недостатком большинства методов является введение в расчет понятия о центре тяжести секундного расхода, сохраняющемся на постоянной части толщины струи, измеренной по нормали от осевой параболы.

Введение его в расчет в принятой форме противоречит условию $v_0 = \text{const}$, $p = \text{const}$ и отсюда эквидистантности профилей верхней, нижней и любой промежуточной струйки.

И, стало быть, все авторы методов построения, применяющие понятие о центре тяжести на нормали, исходят при своих построениях из двух противоречащих друг другу условий и условий неверных.

10. Третьим, также общим, недостатком всех аналитических методов построения профиля является то, что верхний профиль струи претерпевает излом в точке над вершиной осевой параболы и излом нижнего профиля струи в точке под вершиной осевой параболы, если эта вершина осевой параболы, или начало „свободного“ движения располагается до „суженного“ сечения струи.

11. Введение в расчет центра тяжести на нормали обрекает профиль на вакуумность и тем в большей степени, чем выше принимается центр тяжести от нижнего профиля струи, что устанавливается впервые нашими выкладками и что подтверждается опытами Шимеми.

12. В силу изложенного теоретические выкладки Людина, Павлова, Казанской, Бовина, Пузыревского, Дейша и Кригера не могут быть признаны отвечающими своему назначению; поэтому не могут быть приняты для гидротехнической практики профили Людина, Павлова, Казанской, Бовина, Пузыревского, Дейша, Моррисона и Броди, Мюллера, Американской консультации Днепростроя.

13. Поскольку экспериментальные данные, полученные на моделях водосливов с практическим профилем, не могут дать представления о профиле с нулевым давлением струи, при определении этого профиля наиболее целесообразным является пользование экспериментальными данными, полученными на водосливе Базена, к каковым могут быть отнесены данные Базена, Шимеми и Кригера.

14. Из экспериментальных материалов по профилю струи, поскольку материал Базена недостаточен для суждения о всем профиле струи и поскольку опыты Шимеми произведены в небольшом масштабе, наибольшей практической ценностью обладает материал, данный Кригером, на основании его замеров струи в интервале

$$0 < \frac{x}{H} < 1,5.$$

Профиль струи, по Кригеру, обладает несколько большим по сравнению с профилем Шимеми сечением и равномерно обтекает последний на всем

протяжении (даже на участке при $x > 1,5$). Все это дает повод полагать, что профиль нижней поверхности струи или профиль тела плотины с нулевым давлением струи будет располагаться или по профилю Шимеми, или по профилю Кригера, или в непосредственной близости к одному из них.

15. Профиль кладки по Кригеру, поскольку его радиусы кривизны по отношению к радиусам кривизны профиля нижней поверхности струи по Кригеру отвечают условию п. 4 настоящего заключения, что можно видеть из таблицы 14, и поскольку при экспериментах в ГЭИ с этим профилем в условиях $\frac{H}{w} = 0,18$ до 0,665 установлена безвакуумность профиля кладки,

можно считать, независимо от величины $\frac{H}{w}$, безвакуумным и рекомендовать его для гидротехнической практики, по введению наших коррективов в координаты.

16. Учитывая наличие безвакуумного профиля 2 ЛЦ, обладающего несколько меньшим сечением, чем профиль кладки по Кригеру, и то, что последний профиль в среднем на 30% полнее профиля струи по Кригеру, надо допустить возможность получения ряда безвакуумных профилей с меньшим, но все же положительным давлением струи. Эти профили должны располагаться между профилем струи по Кригеру и профилем кладки по тому же автору. Сечение промежуточных профилей, учитывая влияние тела плотины на ход струи, все же будет близким к сечению кладки по Кригеру. Возможная экономия по сравнению с кладкой Кригера может быть оценена для этих профилей максимум 1—2%.

ЧАСТЬ II

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ

26. Общие данные

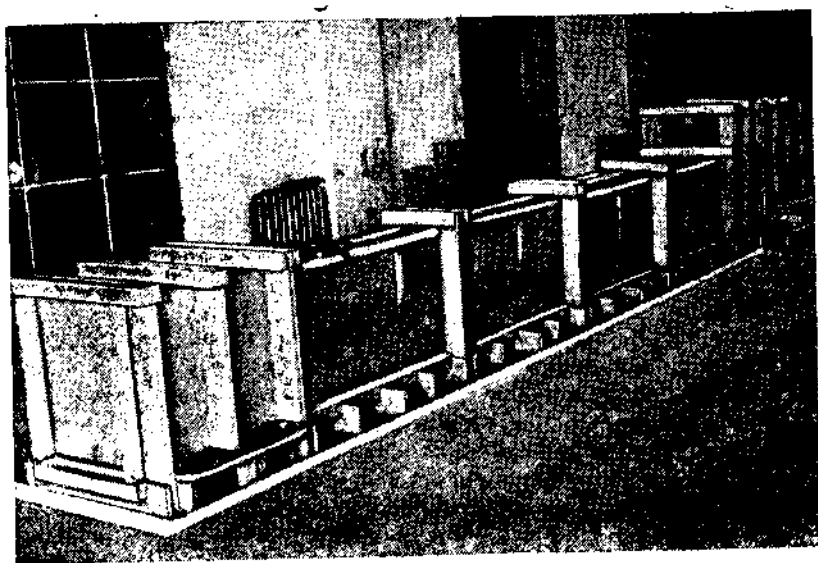
Целью настоящей работы является подведение итогов многочисленным опытам с профилем водосливной плотины, произведенным в Гидроэнергетическом научно-исследовательском институте (б. гидравлическом отделе ЦАГИ) по заданиям проектирующих и строительных организаций. Из результатов испытаний более 20 различных профилей водосливов здесь будет сообщено о наиболее характерных и будут сопоставлены наиболее характерные данные по коэффициенту расхода, по давлению струи, по пульсации давления струи и по другим факторам как в условиях плоской, так и в условиях пространственной задачи, как при полном, так и при частичном открытии затвора. Здесь будут также приведены соображения относительно безвакуумного профиля с минимумом сечения.

Опыты ГЭИ о которых речь будет ниже, проводились различными экспериментаторами, в различное время (на отрезке в четыре года) и в различных гидравлических лотках. Расходы измерялись двумя или даже тремя различными водосливами, но главная масса опытов была проведена в 1928 г. в большом гидравлическом лотке, размеры коего: длина рабочей части — 8,0 м, высота — 0,9 м, ширина — до 0,7 м. Расход до 150 л/сек измерялся водосливом Томсона. Общий вид лотка представлен на фиг. 29. Малый лоток идентичен по устройству; он обладает той же длиной и высотой, шириной — 0,5 м и расходом — до 60 л/сек, измеряемым томсоновским же водосливом.

Опыты проводились всегда в плоской, реже в условиях пространственной задачи на моделях водосливов, в большинстве случаев в 1:50 или 1:40 натуральной величины. При этом размеры модели обычно не превосходили по высоте 0,75 м по длине по гребню 0,6 м. Модели чаще всего представляли собой деревянный каркас, обтянутый с поверхности, омываемой потоком, прокатанным и отшлифованным листом латуни толщиной 1—0,5 мм. Реже модель состояла из каркаса, покрытого слоем бетона, провощенного с поверхности, и лишь в одном случае она была сплошь бетонной.

Для измерения давления струи на омываемую потоком поверхность модели, нормально к этой поверхности и заподлицо с ней в ряде точек профиля выводились трубочки диаметром 2—2,5 мм, соединяемые другим концом с батареей пьезометров.

Всякий раз по изготовлении модель подвергалась предварительной проверке в отношении качества поверхности, в отношении точности соблюдения размеров (металлическим шаблоном), в отношении качества выводов пьезометров на поверхность водослива и др. После этой проверки модель водо-



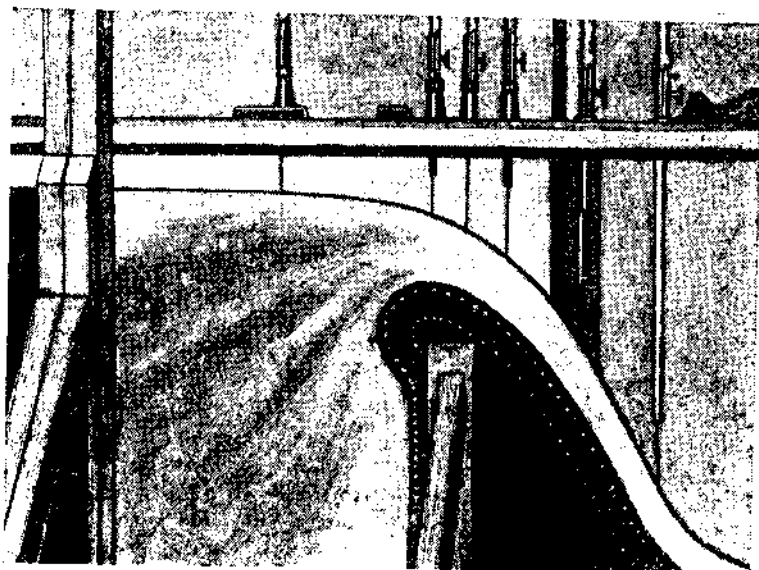
Фиг. 29.

слива устанавливалась в рабочую часть гидравлического лотка (фиг. 30). При этом стремились избежать возможной фильтрации под модель и с боков ее при стыке со стеклянными стенками лотка. Для этой цели по контуру примыкания прокладывался резиновый шнур, а щели промазывались цементной замазкой на лаке. Стремилась, кроме того, в точности соблюсти величину откоса напорной грани по отношению к полу лотка и соблюсти горизонтальность гребня водослива.

Затем следовали: установка нуля мерного томсоновского водослива (в головной части лотка) при помощи одной подвижной и одной неподвижной мерных игл, или так называемых шпитцен-масштабов; проверка плотности соединения системы пьезометров под избыточным давлением в 1—2 м вод. ст.; установка нуля напора по шпитцен-масштабу верхнего бьефа (по способу двух шпитцен-масштабов); координирование отверстий пьезометров с помощью подвижного шпитцен-масштаба; заливка пьезометров водой и взятие нуля пьезометров; сравнение отсчетов нулей пьезометров по трубкам и по отсчетам по шпитцен-масштабу; установка ряда шпитцен-масштабов над профилем для измерения толщины переливающейся струи и взятие нулевого отсчета по ним; измерение расстояния между стеклами лотка или между бычками.

До испытания моделей или после испытаний мерный водослив непременно тарировался объемным способом, и колебания горизонтов перед моделью и перед мерным водосливом сглаживались установкой успокоителей. При помощи тех же успокоителей старались достигнуть равномерного распределения скоростей по ширине рабочей части лотка перед моделью.

Тарировка мерных водосливов в верхнем и нижнем гидравлических лотках показала нам, что в наших условиях работы водослива и в интересующем нас интервале расходов коэффициент в формуле связи расхода с напором может быть принят постоянным и равным 1,426 вместо обычно принятого 1,4. В таком случае для определения расхода через водослив надлежало



Фиг. 30.

пользоваться формулой $q = 1,426 h^{3/2}$, где q — в куб. метрах и h — в метрах. При пользовании формулой, обычно принятой, $q = 1,4 h^{3/2}$, должно было получиться преуменьшение расхода на величину $\frac{1,426 - 1,4}{1,426} 100 = 1,8\%$.

На столько же должен был снизиться и коэффициент расхода для водосливного профиля. Только из учета того, что поток в лабораторных условиях имеет более благоприятные условия подхода к телу плотины, и с целью иметь большую гарантию за работу водослива в натуре, мы все же пользовались формулой расхода для томсоновского водослива $q = 1,4 h^{3/2}$, преуменьшая тем самым коэффициент расхода в модели и в натуре на 1,8%. В дальнейшем это обстоятельство следует иметь в виду.

Процесс производства испытаний проходил, как правило, в следующем порядке. До пуска воды координировались нулевые показания шпигтен-маштабов над профилем плотины и в верхнем бьефе; производились начальные отсчеты по ним и пьезометрическим трубкам и затем пускалась вода. При

этом расход, подводимый к модели, устанавливался в соответствии с заданным напором верхнего бьефа, и затем производились записи: профиля потока, показания пьезометров и мерного водослива, или же устанавливался какой-либо произвольный расход и при этом определялся напор над гребнем модели и производились записи давлений и профиля струи. Второй способ позволяет провести эксперимент значительно быстрее.

По известному напору у мерного водослива определялся расход воды через модель; по напору над гребнем модели и длине пролета определялся коэффициент расхода; по разности отчетов по пьезометрам во время и до опытов определялось давление струи в различных точках; по измерениям профиля струи и профиля тела плотины строились оба профиля. Те же записи производились и для других напоров над гребнем.

Для пересчета результатов модельных испытаний и модельных размеров в натуру или обратно мы пользовались законами подобия:

для линейных размеров $L = \lambda l$, где λ — степень уменьшения.

- „ площадей $F = \lambda^2 f$
- „ объемов $\Omega = \lambda^3 \omega$
- „ времени $T = \lambda^{1/2} t$
- „ скоростей $V = \lambda^{1/2} v$
- „ расходов $Q = \lambda^{3/2} q$

Для моделей в 1:50 натуральной величины напоры уменьшились в 50 раз; давление струи приблизительно также в 50 раз (атмосферное давление не моделируется); скорости уменьшались в $\sqrt{50}$ раз и расходы в $50^{3/2} \cdot \sqrt{50} = 50^2$ раз. Коэффициент расхода, как безразмерная величина, изменениям при моделировании не подвергается.

Задачами испытаний гидравлического профиля во всех случаях являлись:

- 1) Исследование профиля на вакуум и устранение вакуума.
- 2) Констатация коэффициента расхода при заданном расчетном напоре.
- 3) Измерение профиля струи.

Все — как в условиях плоской, так и в условиях пространственной задачи. Эти моменты, главным образом, и будут освещены в настоящей работе.

27. Испытание профилей K , K_3 , K_4 и K_5

Четыре указанных профиля водослива были испытаны по заданию Днепровского строительства на моделях в 1:50 натуральной величины в условиях плоской задачи. В соответствии с размерами одного пролета плотины и с масштабом высота модели была равна 0,620 м, длина модели по гребню — 0,260 м, напор над гребнем максимальный с учетом скоростного — 0,179 м.

В сливной части профиля K , K_3 , K_4 и K_5 были выполнены по координатам кладки по Кригеру (фиг. 31), в сопряжении напорной грани с гребнем все они более или менее отличаются друг от друга, а также и от сопряжения кригеровского.

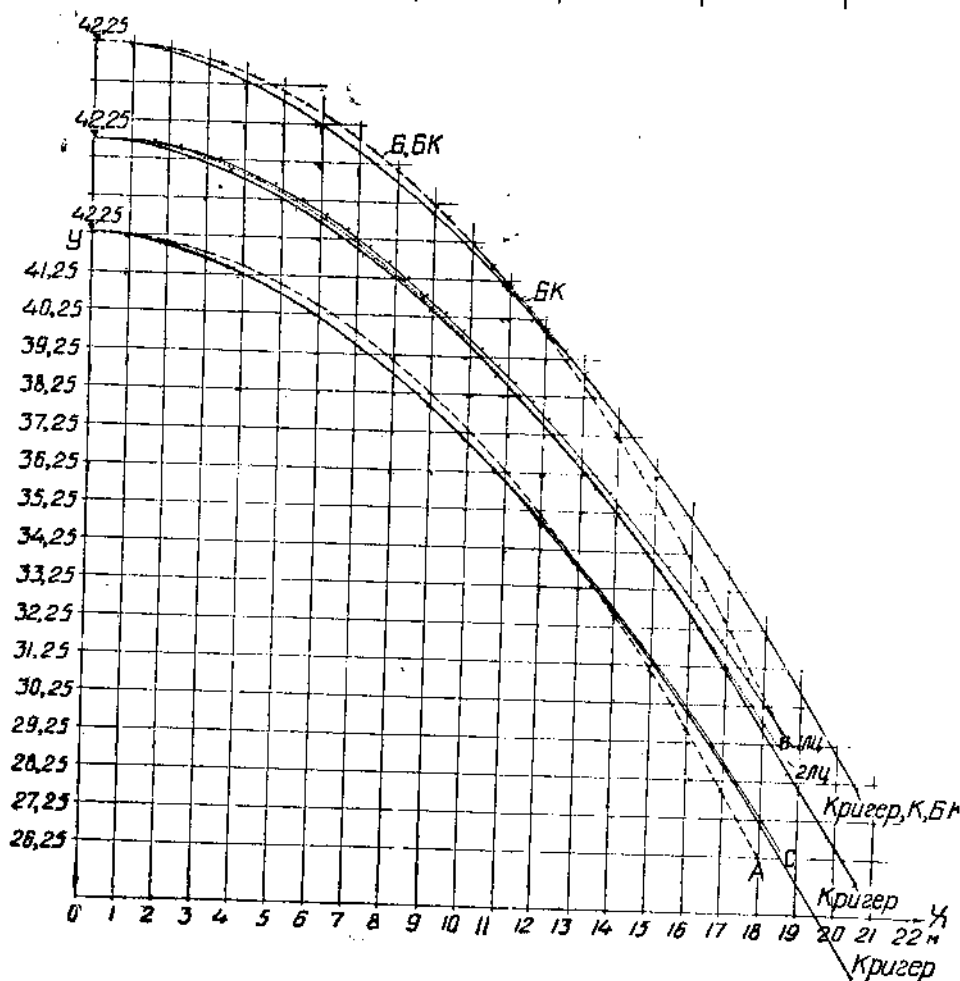
На фиг. 32 представлены эти сопряжения с размерами применительно к днепровским условиям в 1:50 натуральной величины.

Как видно, сопряжение кригеровское наиболее полно из всех; по полноте за ним следует сопряжение профиля K_3 , затем K_5 , K_4 , наконец K .

В соответствии с указанными изменениями профиля, по данным опытов, происходят следующие изменения давления струи на сопрягающую дугу:

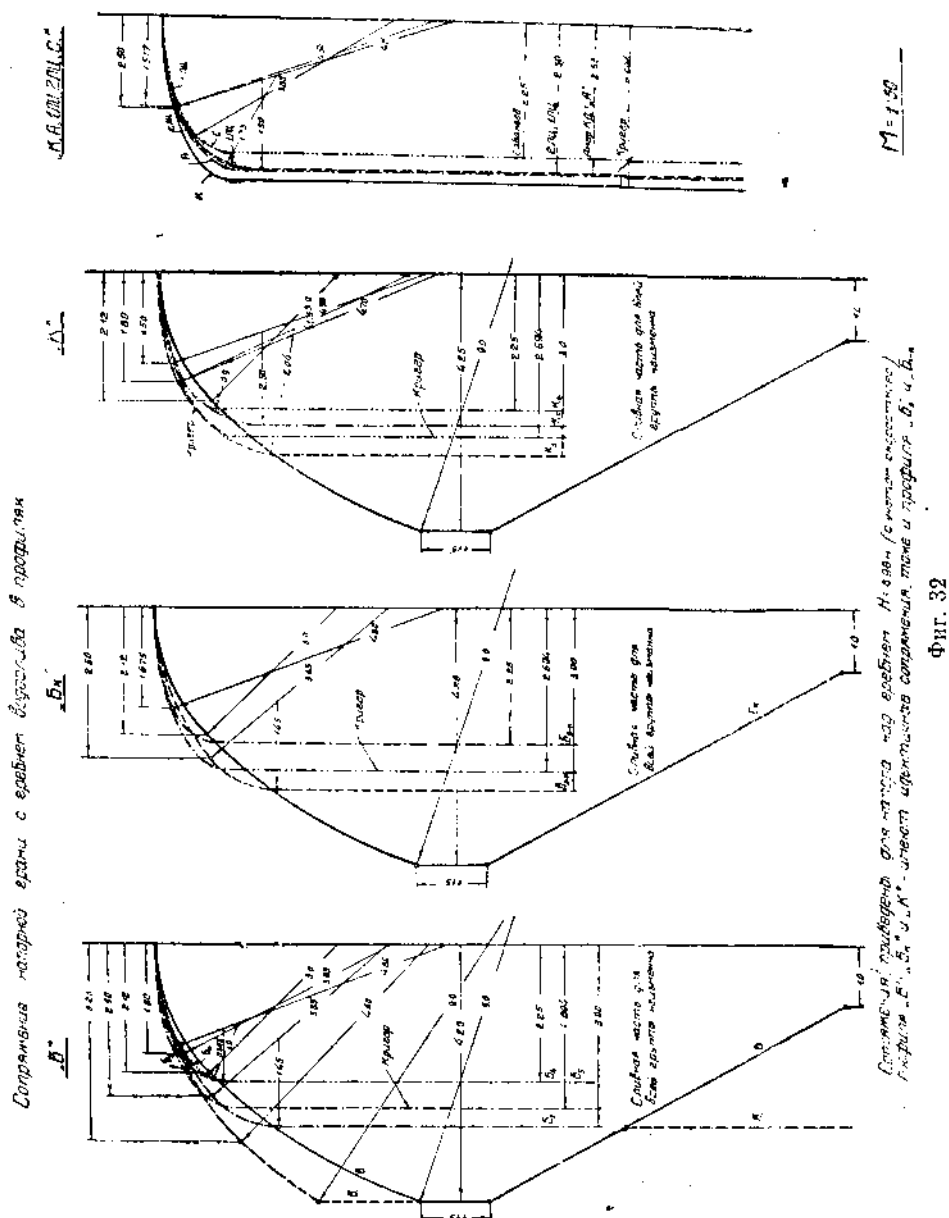
ТАБЛИЦА 23

Профиль (модель)		К	К ₄	К ₆	К
При	$H_{расч} = 179 \text{ мм}$. .	- 38,0 мм	- 17,0 мм	- 8,5 мм	+ 14,0 мм
0,86	$H_{расч} = 154$. .	- 14,0 "	+ 12,5 "	+ 14,0 "	+ 33,0 "
0,725	$H_{расч} = 130$. .	+ 2,0 "	+ 30,0 "	+ 23,0 "	+ 46,0 "



Фиг. 31.

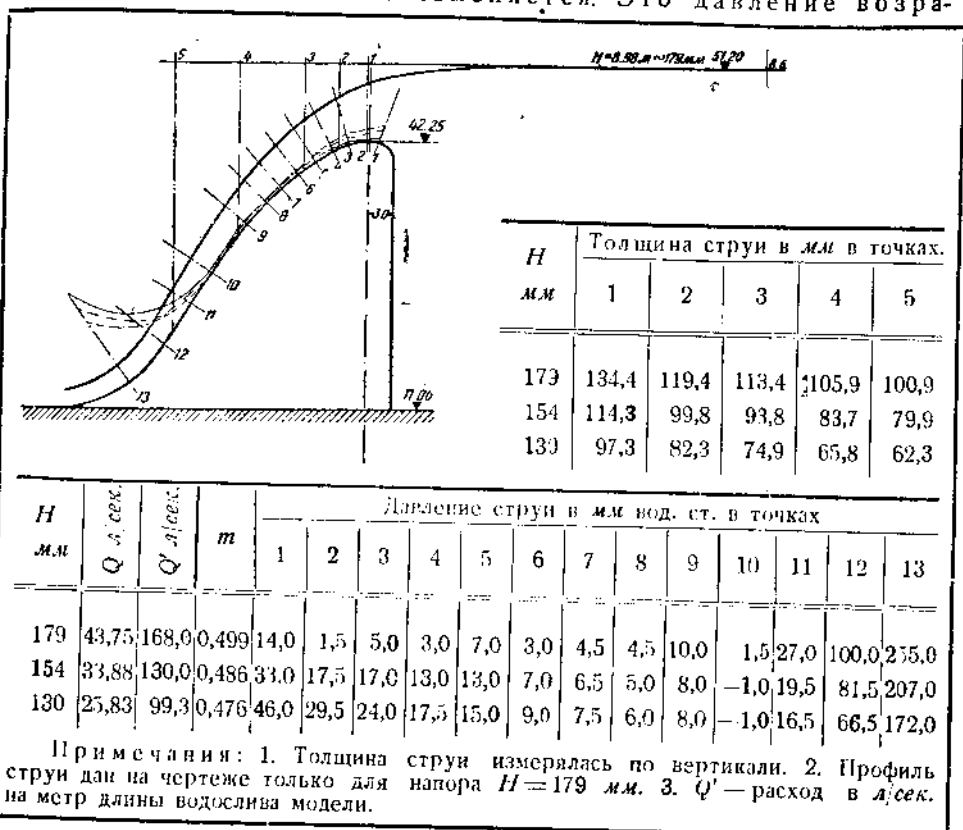
Как видно, изменения давления струи здесь весьма значительны. Эти изменения давления имеют место и на сливной части, но здесь они менее ощутимы и не представляют какой-либо закономерности. В сливной части при расчетном напоре все перечисленные профили безвакуумны. Характер



Φ111. 32

изменения кривых давлений может быть иллюстрирован фиг. 33 и 34, представляющими протоколы испытаний профилей К₃ и К₅. Последние вместе с вышеприведенной таблицей позволяют заключить, что:

1. С изменением напора над гребнем давление струи на профиль водослива изменяется. Это давление возра-



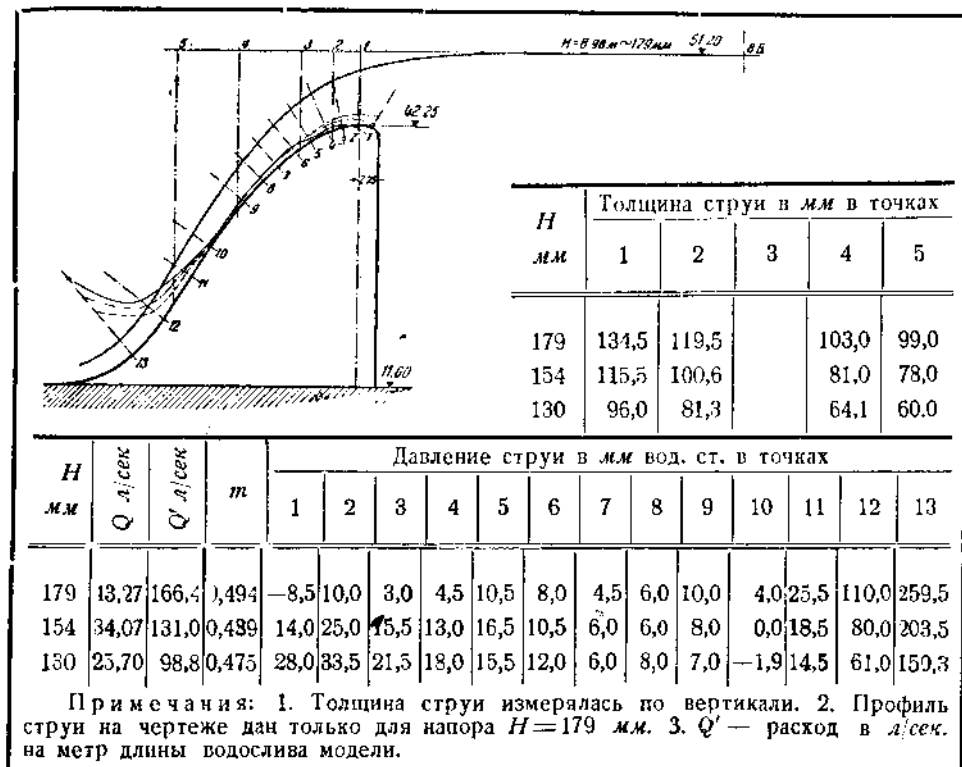
Фиг. 33. Данные испытаний профиля К₃.

стает вместе с ростом напора на напорной грани; оно убывает с ростом напора на верховой части профиля (на участке от $\frac{x}{H}=0$ до $\frac{x}{H} \approx 1,4$) и возрастает на участке при $\frac{x}{H} > 1,4$ с ростом напора.

Кривые давления струи на фиг. 33 и 34 имеют две точки пересечений: одна — против начала сопрягающей дуги (не показана), и другая в точке при $x \approx 1,4$. Здесь, как и ранее, $\frac{x}{H}$ и $\frac{y}{H}$ означают координаты единичного профиля, т. е. профиля для $H=1,0$ м.

Эта закономерность выявилась из испытаний как четырех рассматриваемых теперь профилей, так и всех других испытанных.

2. С увеличением площади сопрягающей гребень водослива с напорной гранью кривой давление в сопряжении, как показывает приведенная выше таблица, возрастает, и уже сопряжение профиля K_2 не имеет вакуума. Вполне очевидно отсюда, что сопряжение профиля Кригера (фиг. 32) также не должно иметь вакуума как при расчетном, так и, тем более, при пониженных напорах.

Фиг. 31. Данные испытаний профиля K_5 .

В отношении коэффициентов расхода (без учета тарировочной кривой) профиля: K , K_2 , K_4 и K_5 дали следующие результаты:

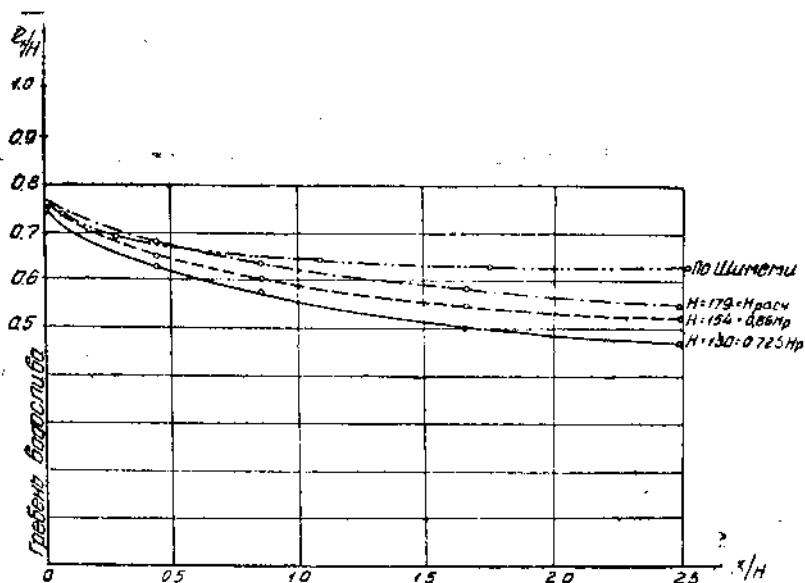
ТАБЛИЦА 24

Профиль (модель)	K	K_2	K_3	K_4	m_{pc}	$\frac{m_{\max} - m_{\min}}{m_{cp}} 100\%$
При $H_{расч}$	0,503	0,501	0,494	0,499	0,499	1,0
• 0,86 $H_{расч}$	0,487	0,491	0,489	0,486	0,483	0,6
• 0,725 $H_{расч}$	0,478	0,478	0,475	0,476	0,4755	0,5

Как видно, эта таблица не представляет каких-либо закономерностей, и очевидно, возможно будет сказать, что:

1. Изменение сопрягающей напорную грань с гребнем водослива дуги не вызывает сколько-нибудь заметных изменений в коэффициенте расхода профиля.

2. Вакуум перед гребнем водослива также заметно не сказывается на коэффициенте расхода. То и другое положение, во всяком случае с точностью до 1% в коэффициенте



Фиг. 35. $e_x = f\left(\frac{x}{H}\right)$ для профилей: K_3 , K_4 , K_5 .

расхода, действительно для сопряжений в рассматриваемом диапазоне.

В первой нашей статье по вопросу о методах построения профиля мы показали, что по данным экспериментов Базена, Ребокка, Коха и Карстаньена. Шимеми и Кригера горизонтальная составляющая скорости струи, переливающейся через горизонтальный острогребенчатый водослив, возрастает. В случае водослива практической формы это возрастание скорости v_x , естественно, должно быть более значительным. По данным испытаний профилей K_3 , K_4 и K_5 возрастание v_x может быть охарактеризовано следующей фиг. 35, представляющей изменение толщины струи, измеренной по вертика-

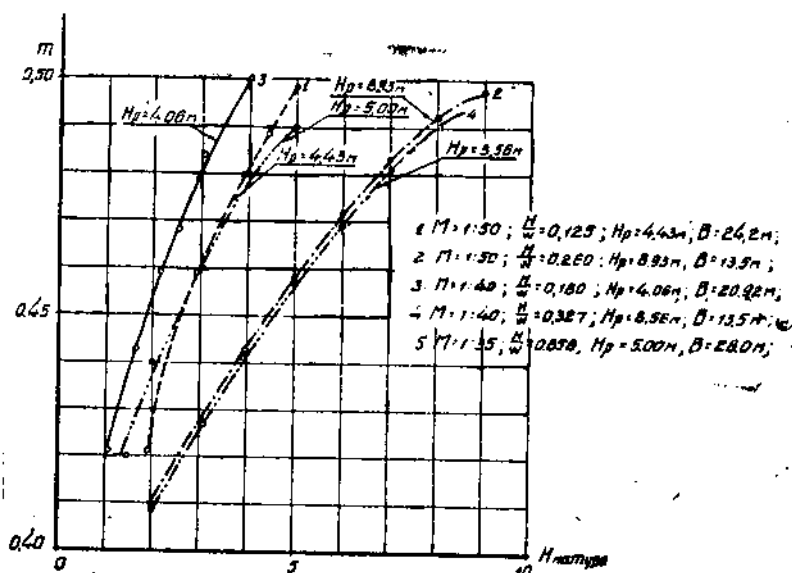
ли e_x для единичного напора $\frac{e_x}{H} = f\left(\frac{x}{H}\right)$. На фиг. 35 для сопоставления представлена та же кривая и по осредненным экспериментальным данным Шимеми.

Из сопоставления кривых следует, что:

1. Практическая форма профиля дает более значительное возрастание горизонтально составляющей скорости v_x по сравнению с таковой же для водослива с острым гребнем.

2. С уменьшением напора над, гребнем происходит более значительное увеличение v_x или уменьшение e_x .

3. Кривая $\frac{e_x}{H} = f\left(\frac{x}{H}\right)$ может служить мерой полноты профиля. Полный профиль даст пониженную кривую хода e_x . Кривая может дать пред-



Фиг. 36. Кривые $m = f(H)$ для профиля Кригера.

ставление и о степени насыщения ниспадающей струи воздухом на водосливах натуре.

Кривые $\frac{e_x}{H}$ и $\frac{v_x}{H} = f\left(\frac{x}{H}\right)$ могут быть непосредственно отнесены к любой модели и к натуре. Непосредственно к натуре могут быть отнесены и коэффициенты расхода. Давления струи при пересчете на натуру следует умножить на $50 = \lambda$ с какой-то поправкой на немоделируемость атмосферного давления.

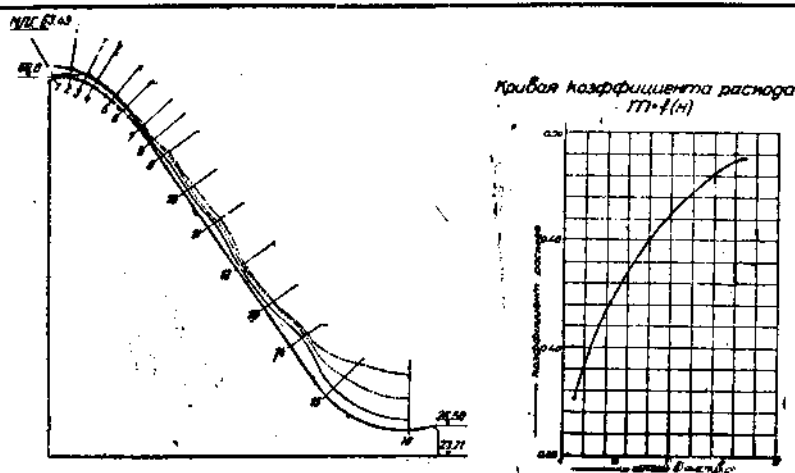
28. Испытание профиля Кригера в условиях плоской задачи

Профиль Кригера испытывался в ГЭИ в 1931 и 1932 гг. по заданиям Укргипровода и Белморстроя на моделях с бетонной облицовкой поверхности в следующих условиях:

ТАБЛИЦА 25

№ по пор.	$\frac{H}{w}$	Расчетный напор		Длина по гребню		Масштаб модели 1:λ
		Натура м	Модель м	Натура м	Модель м	
1	0,125	4,43	0,0886	24,2	0,484	1:50
2	0,180	4,06	0,0101	20,92	0,523	1:40
3	0,260	8,93	0,0179	13,5	0,270	1:50
4	0,327	8,56	0,0214	13,5	0,270	1:40
5	0,655	5,00	0,0143	26,0	0,743	1:35

Как и следовало ожидать из предыдущих выводов, при всех условиях профиль Кригера оказался безвакуумным, и лишь в одном, именно при



H м	Q м³/сек	m	Давление струи в м вод. ст. в точках															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1,50	3,25	0,40	1,30	0,80	0,85	0,55	0,45	0,35	0,30	0,25	0,40	0,40	0,70	0,40	0,45	0,30	1,00	0,85
8,00	10,80	0,482	1,20	0,75	0,80	0,75	0,70	0,55	0,35	0,35	0,70	0,75	1,00	0,60	0,85	1,70	2,40	2,90
4,43	20,15	0,488	0,35	0,20	0,70	0,85	0,70	0,45	0,60	0,50	0,85	1,10	1,40	0,80	1,00	2,00	4,80	5,15

Примечания: 1. Расход дан в пересчете на метр длины водослива в натуре. 2. Давления и напоры линейно пересчитаны из натуре.

Фиг. 37. Данные испытаний профиля Кригера при $H=4,43$ м; $\frac{H}{w}=0,125$ и

$M=1:50$.

$\frac{H}{w}=0,18$ и $H=4,06$, в конце сливной части профиля обнаружился небольшой величины вакуум, который скорее можно объяснить недостаточно хорошим исполнением профиля. Аналогии не говорят за вакуум на этом про-

филе. Таким образом в границах $0,125 \leq \frac{H}{W} \leq 0,655$ профиль Кригера — профиль безвакуумный.

В отношении коэффициента расхода результаты испытаний этого профиля могут характеризоваться фиг. 36 и, кроме того, нижеследующей таблицей 26.

ТАБЛИЦА 26

H	4,430	4,060	8,980	8,560	5,000
$\frac{H}{W}$	0,125	0,180	0,260	0,327	0,655
m	0,488	0,501	0,498	0,495	0,490

Относительно закономерности последней трудно говорить, ибо опыты производились различными лицами, в различное время, в различных лотках и при различной степени точности установки мерных устройств. Опыты этой группы характеризуем из отчетных планшет фиг. 37.

29. Испытание профиля Бовина с различными видами сопряжений напорной грани с гребнем в условиях плоской задачи

Теория Бовина определяет форму профиля практического водослива только за его гребнем. До гребня сопряжение должно быть в каждом отдельном случае выбрано на основании хотя бы данных Ребокка или Миловича. Для днепровских условий эти сопряжения были предложены самим Бовиным на основании, главным образом, ребоковских данных.

Под маркой B_1 ; B_2 ; B_3 ; B_4 , т. е. с четырьмя различными сопряжениями, профиль был испытан в ГЭИ для днепровских условий. Модели водосливов облицовывались металлическим листом. Масштаб 1:50.

Как видно из фиг. 31, профиль Бовина от гребня и до значения $\frac{x}{H} = 1,25$ обладает большей полнотой, нежели кригеровский профиль, и его радиусы кривизны на участке между $0 \leq \frac{x}{H} \leq 0,75$ больше соответствующих кригеровских, и затем они становятся меньше последних. В соответствии с этим при наличии тождественных сопрягающих дуг профиль Бовина должен иметь повышенное давление струи на участке профиля между $0 < \frac{x}{H} < 0,75$ и пониженное — при значении $\frac{x}{H} > 0,75$. (Здесь начало координат принимается на гребне водослива.)

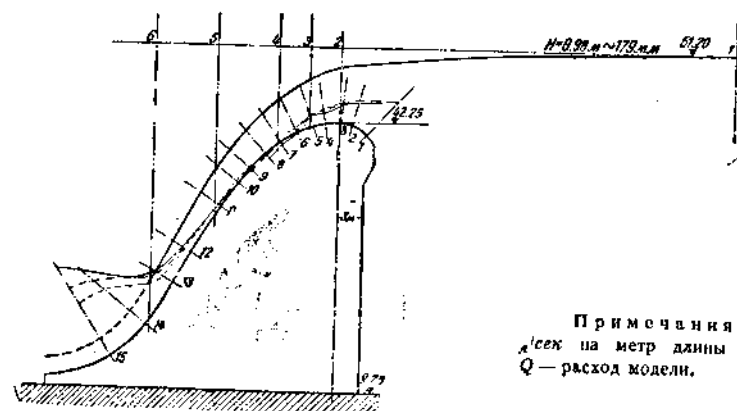
Согласно фиг. 32 можно заключить, что, как и в случае сопряжения, профилей К сопряжение профилей Б должно иметь ту же грацию давления в сопряжении. Именно, с увеличением полноты сопрягающих дуг давление струи в сопряжении будет возрастать, по фиг. 32, и последова-

тельности от Б к Б₅, далее к Б₄, к Б₃ и к Б₁. Сопряжения Б₅ и Б₄ почти равновелики по площади, но Б₅ имеет более резкий изгиб дуги, и потому сопряжение Б₅ должно иметь меньшее давление струи на участке небольших радиусов кривизны.

Давление струи на сопрягающей дуге может быть охарактеризовано таблицей 27.

ТАБЛИЦА 27

Профиль	Б ₅	Б ₄	Б ₃	Б ₁	Примечание
При $H_{расч}$	-30,0	-18,0	+35,0	+55,7	Давление в мм вод. ст.
" 0,86 $H_{расч}$	+ 4,0	+14,0	+49,0	+62,7	
" 0,725 $H_{расч}$	+26,0	+33,0	+57,0	+64,0	



Примечания: 1. Q' — расход в л/сек на метр длины водослива модели, 2. Q — расход модели.

H мм	Q л/сек	Q' л/сек	m	Давление струи в мм вод. ст. в точках														
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
179	44,19	168,6	0,498	110,7	55,7	44,3	24,7	23,8	-1,0	-6,3	-18,3	-7,0	0,0	9,3	23,0	51,0	198,0	248,0
151	35,15	134,1	0,402	110,3	62,7	50,0	31,7	29,0	-4,3	1,0	-9,3	-2,0	0,0	9,0	21,3	40,7	157,0	188,0
130	28,96	102,9	0,487	107,7	64,0	53,3	35,7	30,3	12,3	7,3	-8,3	1,7	0,0	9,0	18,7	33,3	125,7	146,7

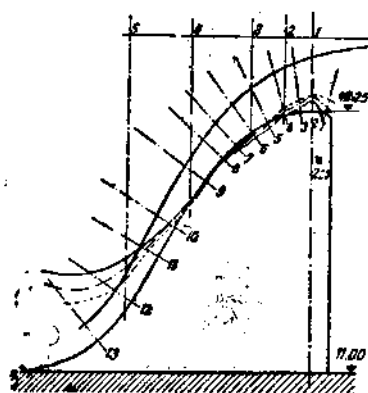
Фиг. 38. Данные испытаний профиля Б₄.

Вследствие того что последующий за сопряжением элемент профиля, по сравнению с таковым в профилях К, имеет большие радиусы кривизны и более полог, давление на сопряжение в профилях Б, естественно, получилось несколько большим, чем на профилях К. В сливной же части профиля, там, где радиусы кривизны профиля Б меньше соответствующих радиусов профиля К, профиль Б имеет пониженное давление струи по сравнению с Кримером. А именно обнаружено:

ТАБЛИЦА 28

Профиль	Б ₅			Б ₄			Б ₃			Б ₁		
Напор в м.м (модель) . . .	179	154	130	179	154	130	179	154	130	179	154	130
Распространение вакуума в интервале по оси xx	от 0,5	0,7	0,85	0,5	0,7	1,0	0,5	0,6	0,8	0,5	0,8	0,9
Максимальная величина вакуума в интервале в м.м вод. ст. (модель)	до 1,7	1,6	1,6	1,7	1,5	1,2	1,7	1,6	1,5	1,25	1,2	1,1
	-13,5	-5,0	-1,0	-14,0	-7,0	-4,0	-16,5	-7,5	-2,0	-16,5	-9,8	-3,3

Как видно, профиль Б, независимо от вида сопряжения, есть профиль вакуумный. Среднее распространение вакуума, при расчетном напоре, около



H м.м	Толщина струн в м.м в точках.				
	1	2	3	4	5
179	136,7	120,0	113,0	113,0	93,0
154	117,4	100,1	92,5	92,0	72,3
130	98,7	82,1	73,9	71,5	55,3

H мм	t	Давление струн в мм вод. ст. в точках												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
179	0,499	-18,0	25,0	8,0	2,0	-15,0	-14,0	-14,0	-1,0	-3,0	14,5	44,5	115,0	213,0
154	0,487	14,0	36,0	20,5	12,0	- 4,0	- 5,0	- 7,0	2,0	-1,0	12,0	36,5	79,5	158,0
130	0,472	33,0	42,0	27,0	18,0	2,0	1,5	- 4,0	4,0	-1,0	10,0	29,5	53,0	111,0

Примечания: 1. Толщина струн измерялась на вертикали. 2. Напоры, давления и толщины струн даны для модели в м.м.

Фиг. 39. Данные испытаний профиля Б₄.

1,2 м на оси xx . Максимальная величина вакуума — 16,5 м.м, чему, при линейном пересчете давления на натуру, соответствует $16,5 \cdot 50 = 0,800$ м вод. ст. или вакуум в 0,08 ат. Ось xx таблицы приведена к напору в 1,0 м, а начало координат принято на гребне водослива.

Коэффициент расхода профилей Б, без учета тарировочной кривой, как показали опыты, несколько не выше такового для профилей К. Очевидно, вакуум в 16,5 мм для модели при распространении его только на участке, для которого $\frac{x}{H} > 0,5 - 0,6$, не сказывается на коэффициенте расхода.

Коэффициенты профилей Б приводим в нижеследующей таблице.

ТАБЛИЦА 29

Профиль	Б ₁	Б ₂	Б ₃	Б ₄	m_{cp}
$H = 179$ мм	0,493	0,487	0,499	0,493	0,493
$H = 154$ "	0,492	0,476	0,487	0,480	0,484
$H = 130$ "	0,487	0,463	0,472	0,466	0,472

Эти коэффициенты даже несколько ниже кригеровских.

Результаты испытаний некоторых профилей из группы Б, именно профилей Б₁ и Б₄, представлены на фиг. 38 и 39.

30. Испытание профилей БК или КБ

Профиля этой группы испытаны по заданию Днепростроя и применительно к его условиям. Масштаб моделей 1:50.

В сливной части профиля этой группы одинаковы и представляют профиль, в верховой части выполненный по Бовину, в низовой (конец слива) — по Кригеру (фиг. 31). Сопряжение напорной грани с гребнем по фиг. 32.

Вследствие некоторого возрастания площади профиля БК по сравнению с Б от него естественно ожидать лучшую характеристику в смысле давления струи. Так, например, для профиля Б₃К, имеющего то же сопряжение напорной грани с гребнем, что и профиля Б₃, мы имеем максимальную величину вакуума на сливной части профиля 5,0 мм против 16,5 на профиле Б₃ и распространение вакуума между $0,3 < \frac{x}{H} < 0,7$ вместо $0,5 < \frac{x}{H} < 1,7$ на профиле Б₃.

Сопряжение профиля, как и Б₃, свободно от вакуума. Профиль Б₃К имеет в сливной части вакуум на том же участке, но меньшей величины, чем у Б₃К, а в сопряжении, как и следовало ожидать, имеет уже значительный вакуум — до 12 мм вод. ст. Этот вакуум в сопряжении профиля все же меньше, чем таковой в сопряжении профилей Б₄ и Б₅, по причине, указанной выше.

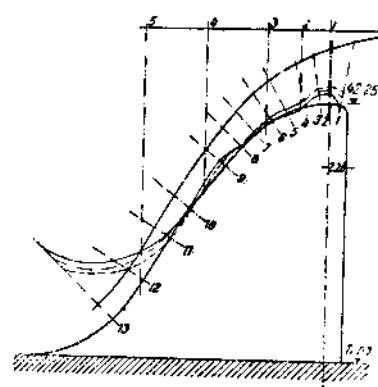
Коэффициенты расхода профилей в условиях плоской задачи оказались следующими.

ТАБЛИЦА 30

Профиль	БК	Б ₃ К	К ₃ Б	m_{cp}
При $H = 179$ мм	0,503	0,498	0,499	0,500
" $H = 154$ "	0,500	0,482	0,487	0,490
" $H = 130$ "	0,486	0,466	0,470	0,474

Изменение горизонтальной составляющей скорости здесь примерно таково же, как и для всех предыдущих групп профилей (фиг. 35).

Для иллюстрации этой группы экспериментов приводим фиг. 40, характеризующую профиль Б₃К.



H мм	Толщина струи в мм в точках				
	1	2	3	4	5
179	136,2	118,3	113,5	104,8	6,5
154	117,0	99,5	92,8	84,0	76,5
130	7,7	80,6	74,2	64,8	58,2

H мм	Q л/сек.	Q' л/сек.	m	Давление струи в мм вод. ст. в точках												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
179	43,75	168,3	0,499	-12,0	22,0	23,0	1,0	-1,0	5,5	5,0	7,5	18,5	4,0	10,0	84,0	261,0
154	33,96	130,6	0,487	16,5	33,5	32,0	11,0	5,5	10,5	8,0	9,0	16,5	3,0	6,0	62,0	207,0
130	25,46	98,0	0,470	32,0	40,0	36,0	16,0	10,0	11,5	8,0	7,5	12,5	-0,5	0,0	46,0	165,0

Примечания: 1. Толщина струи измерялась по вертикали. 2. Профиль струи на чертеже дан только для напора 179 мм. 3. Q' — расход на метр длины водослива модели.

Фиг. 40. Данные испытаний профиля Б₃К.

31. Испытание профиля Американской консультации Днепро-строя — А

Этот профиль был испытан по заданию Днепровского строительства и применительно к условиям последнего. Масштаб модели 1:50.

Сливная часть этого профиля почти идентична бовинской. Она также имеет преувеличенные радиусы кривизны на участке от $0 = \frac{x}{H}$ до 0,75, а далее, на последующем участке, радиусы — преуменьшенные по сравнению с Кригером. Однако кривая слива, как показывает фиг. 31, здесь несколько более полна по сравнению с профилями Б и несколько менее полна, нежели в профилях БК. В соответствии с этим профиль А должен иметь лучшую характеристику давления по сравнению с таковой профиля Б и худшую, нежели у профиля БК или КБ.

В самом деле, мы здесь имеем на сливе максимальную величину вакуума в 11 мм вод. ст. против 13—16,5 мм на профиле Б; 5 мм на профиле БК и положительного давления на сливе профиля К. Распространение вакуумного участка здесь $0,55 < \frac{x}{H} < 1,3$ против $0,5 < \frac{x}{H} < 1,7$ на профиле Б и против $0,3 < \frac{x}{H} < 0,7$ на профиле БК.

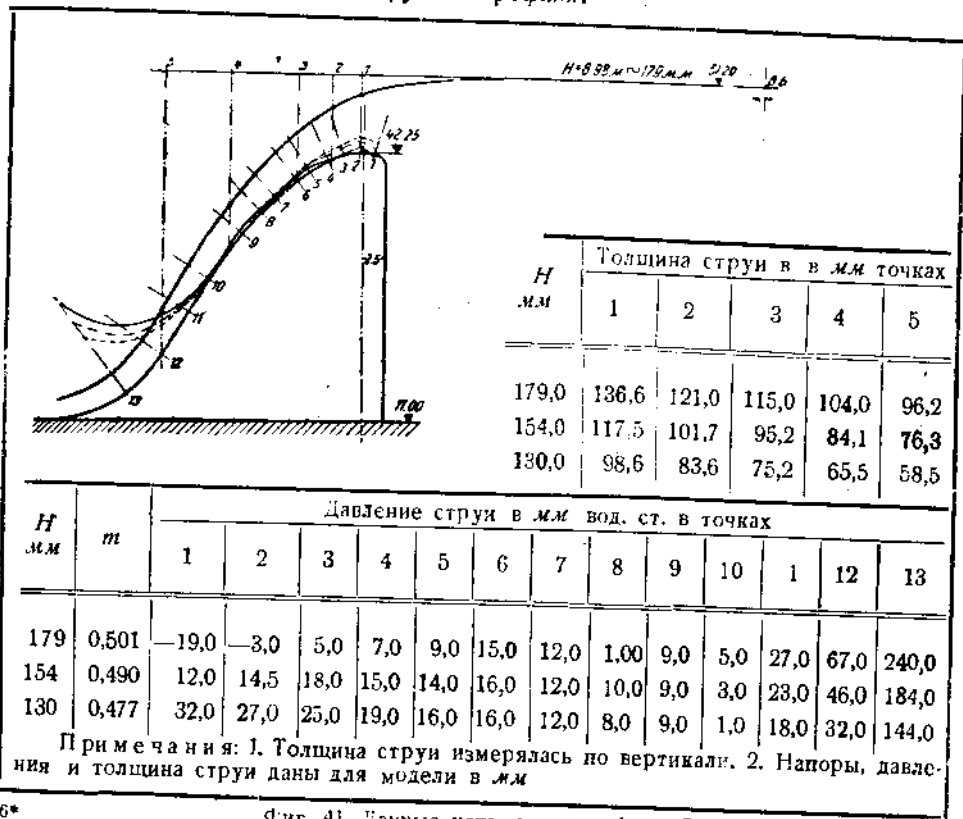
Коэффициент расхода профиля А в условиях плоской задачи оказался равным:

$$\begin{aligned} \text{При } H_{\text{расч}} \dots m &= 0,504 \\ " \quad 0,86 H_{\text{расч}} \dots m &= 0,491 \\ " \quad 0,725 H_{\text{расч}} \dots m &= 0,476 \end{aligned}$$

32. Испытание профиля Сабанеева — С

(По заданию Днепростроя)

В сливной части этот профиль С (фиг. 31) почти подобен кригеровскому. По сопряжению он близок к профилю К₄ (фиг. 32) и имеет с последним почти тождественную кривую давления струи. Давление струи на сопрягающую кривую для того и другого профиля:



Примечания: 1. Толщина струи измерялась по вертикали. 2. Напоры, давления и толщина струи даны для модели в мм

Фиг. 41. Данные испытания профиля С.

ТАБЛИЦА 31

	Профиль С		Профиль К ₄	
	Точка 1	Точка 2	Точка 1	Точка 2
$H_{расч}$ (модель)	— 19,0 мм	— 3,0 мм	— 17,0 мм	— 1,0 мм
0,86 $H_{расч}$	+ 12,0 „	+ 14,5 „	+ 12,5 „	+ 17,0 „
0,725 $H_{расч}$	+ 32,0 „	+ 27,0 „	+ 30,0 „	+ 28,5 „

Давление струи на сливную часть профиля С положительно (фиг. 41).
Коэффициент расхода профиля С:

$$\begin{aligned} \text{При } H_{расч} &= 179 \text{ мм} \quad m = 0,501 \\ \text{„ } 0,86 H_{расч} & \quad m = 0,490 \\ \text{„ } 0,725 H_{расч} & \quad m = 0,477 \end{aligned}$$

Для К₄ мы имели: 0,501, 0,491 и 0,478, т. е. совпадающие коэффициенты.

Кривые $\frac{e_x}{H} = f\left(\frac{x}{H}\right)$ для этого профиля оказались тождественными с приведенными ранее на фиг. 35.

33. Испытание профиля 1ЛЦ (по заданию Днепростроя)

Как видно на фиг. 31 и 32, этот профиль имеет сопряжение напорной грани с гребнем, предрасполагающее на вакуум. Сливная часть его имеет характерную для вакуумных профилей вспученность за гребнем, и лишь вследствие значительной полноты сливной части он свободен от вакуума. Его коэффициенты расхода:

$$\begin{aligned} \text{При } H_{расч} & \quad m = 0,505 \\ \text{„ } 0,86 H_{расч} & \quad m = 0,487 \\ \text{„ } 0,725 H_{расч} & \quad m = 0,479 \end{aligned}$$

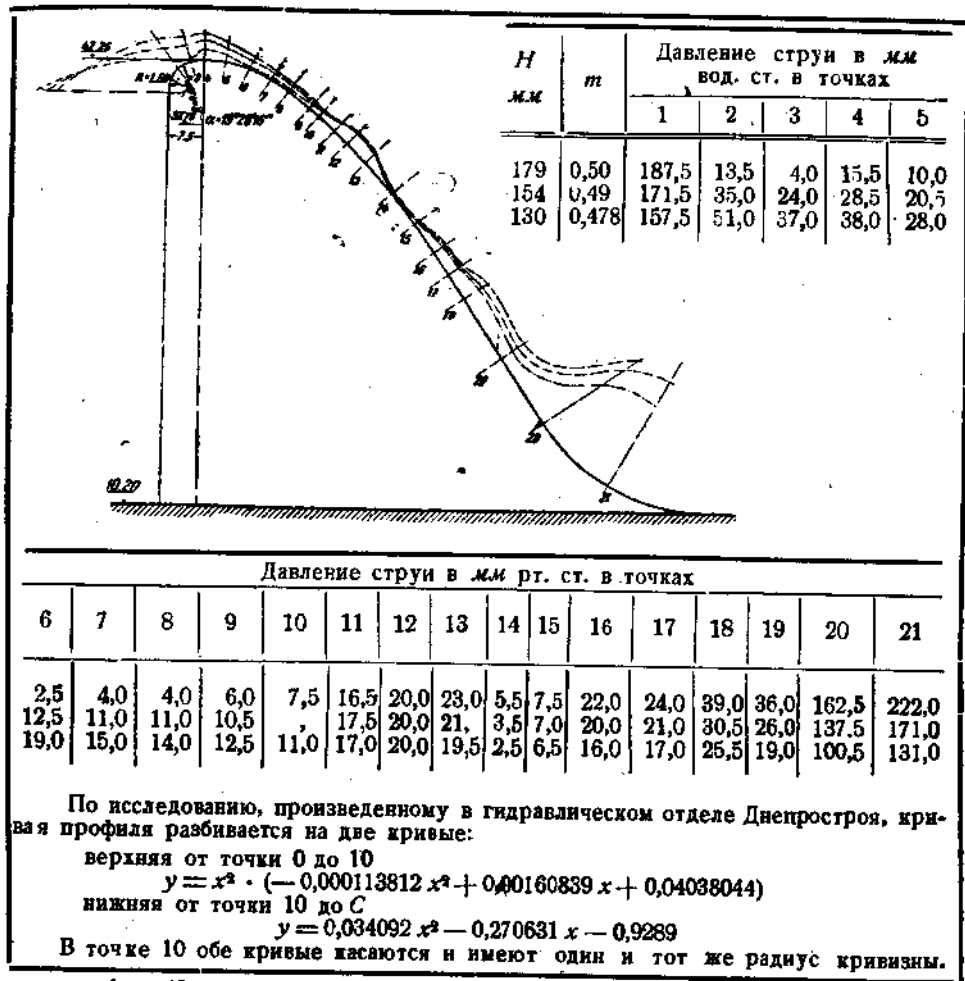
Координаты этого профиля, как и всех других испытанных, приводим к общей таблице III в конце статьи.

34. Испытание профиля 2ЛЦ

Профиль испытан по заданию Днепровского строительства. Формы сопряжения и слива его представлены на фиг. 31 и 32. При совмещении напорных граней профиль 2ЛЦ оказывается более полным и облегающим профиль струи по Кригеру и несколько менее полным, чем профиль кладки по тому же автору. Оказался из испытаний безвакуумным; принят и осуществлен Днепростроем. Его площадь приблизительно на 1%₀ менее площади профиля по Кригеру. Его коэффициенты расхода:

$$\begin{aligned} \text{При } H_{расч} & \quad m = 0,50 \\ \text{„ } 0,86 H_{расч} & \quad m = 0,49 \\ \text{„ } 0,725 H_{расч} & \quad m = 0,478 \end{aligned}$$

Фиг. 42 представляет результаты испытаний. Координаты — в конце статьи в таблице III.



Фиг. 42. Данные испытаний профиля 2ЛПЦ в условиях плоской задачи.

35. Вид профиля, давление струи и коэффициент расхода

Во всех перечисленных опытах в отношении давления струи имело место следующее распределение его. С ростом напора оно возрастало на напорной грани водослива, равняясь гидростатическому; оно убывало при этом на верховой части плотины и возрастало в конце части сливной. Особо резко изменялось давление на сопрягающей части профиля (сопряжение гребня с напорной гранью). Всякая сопрягающая дуга, близкая к кригеровской или ей равная, была при всех условиях свободна от вакуума (K_3 ; B_3 и B_1). Также были свободны от вакуума и сливные части тех профилей, кои были

близки к кригеровскому или ему тождественны (C ; 1ЛЦ; 2ЛЦ; K ; K_4 ; K_5 и K_3).

Изменение формы сопрягающих дуг, формы сливной части профиля, независимо от вакуума, как показали эксперименты, не дают повода для установления связи между коэффициентом расхода и формой сопряжения, формой слива и величиной вакуума, и с точностью до 1,00% можно считать коэффициент независимым от перечисленных факторов в рассмотренных пределах их измерения. Так, для расчетного напора нами получены коэффициенты (в условиях плоской задачи):

ТАБЛИЦА 32
Для профилей вакуумных только перед гребнем

Профиль	K	K_1	K_3	C	B_3K	
Вакуум	-38,0	-17,0	-8,5	-19,0	-12,0	$m_{cp} = 0,4995$
Коэффициент	0,503	0,501	0,494	0,501	0,499	

ТАБЛИЦА 33
Для профилей вакуумных только в верховой части слива

Профиль	B_3	B_1	A	B_3K	
Вакуум	-16,5	-16,3	-11,0	-5,0	$m_{cp} = 0,4985$
Коэффициент	0,499	0,493	0,504	0,498	

ТАБЛИЦА 34
Для профилей, вакуумных перед гребнем и в сливной части

Профиль	B_3	B_1	
Коэффициент	0,493	0,487	$m_{cp} = 0,490$

ТАБЛИЦА 35
Для профилей безвакуумных

Профиль	K_3	1ЛЦ	2ЛЦ	Кригер ¹	
Коэффициент	0,493	0,505	0,500	0,498	$m_{cp} = 0,500$

¹ При $\frac{H}{W} = 0,36$

Удивительно, что профили Б вакуумные и в сопряжении и на сливе дали коэффициенты расхода на $1,0-2,0\%$ ниже, чем коэффициенты всех других профилей. Эти пониженные коэффициенты все же, по нашему мнению, еще не дают повода для обобщений.

Приведенные коэффициенты действительны и для натуры; в данном случае для водослива Днепровской плотины, работающего в условиях плоской задачи. Коэффициент расхода Днепровского профиля плотины должен быть согласно вышеприведенным данным $m = 0,500 \cdot 1,018 = 0,509$. Здесь $1,018$ — коэффициент, учитывающий тарировку водослива.

36. Коэффициент расхода практического водослива по различным формулам

Коэффициент расхода практического профиля водослива, если этот профиль, как и в рассмотренных выше случаях, не особо сильно деформирует струю, переливающуюся через базеновский водослив, может быть подсчитан по формуле для острогребенчатого горизонтального водослива с вертикальной напорной гранью. При пользовании формулами коэффициента расхода для острогребенчатого водослива в формулу надлежит ввести вместо напора под острым гребнем h напор над гребнем практического водослива H ; вместо высоты острогребенчатого водослива w — высоту практического водослива W ; вместо коэффициента m_h коэффициент m_H . Связь между перечисленными величинами согласно данным Базена и Ребока:

$$h = 1,125 H,$$

$$w = W - 0,112 h = H - 0,125 H$$

для m_h и $m_H = m$ из

$$Q = m_h \cdot h^{3/2} \cdot \sqrt{2g} = m_H \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$$

(h и H с учетом скорости подхода потока к водосливу) и

$$\frac{m_h}{m_H} = \left(\frac{H}{h} \right)^{3/2} = \left(\frac{H}{1,125 H} \right)^{3/2}$$

откуда

$$m_H = m = 1,195 m_h$$

и

$$m_H = 1,195 \cdot \frac{2}{3} \mu_0 = 0,797 \mu_0.$$

В таком случае, полагая, что рассмотренные выше профили водосливов не сильно разнятся от профиля нижней поверхности струи, переливающейся через водослив Базена, возможно будет, приспособив формулу коэффициентов острогребенчатого водослива, вычислить и коэффициенты наших моделей — водосливов с практическим профилем. Тогда нормативная формула швейцарских инженеров и архитекторов:

$$\mu_* = 0,615 \left(1 + \frac{1}{1000h + 1,6} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right],$$

проверенная для условий $0,025 \leq h \leq 0,8$ м, или

$$\frac{h}{w} \leq 1,0,$$

применима в нашем случае. После приспособления ее для практической формы водослива она получает вид:

$$m_H = 0,797 \cdot 0,615 \left(1 + \frac{1}{1,125H + 1,6} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{1,125H}{1,125H + W - 1,125H} \right)^2 \right],$$

или

$$m_H = m = 0,490 \left(1 + \frac{1}{1,125H + 1,6} \right) \left[1 + 0,6325 \left(\frac{H}{H+W} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Подсчитанный по этой формуле коэффициент расхода для модели Днепровской плотины оказался равным $m_H = 0,511$; он годен по законам подобия и для природы.

Формула Ребокка для острогребенчатого водослива

$$\mu_0 = 0,605 + \frac{1}{1000h - 3} + \frac{0,08h}{w}$$

проверена в пределах:

$$\begin{aligned} w &= 0,125 \text{ до } 0,500 \text{ м,} \\ h &= 0,01 \text{ до } 0,415 \text{ м;} \end{aligned}$$

или в интервале $0,02 < \frac{h}{w} < 3,3$ и применима в нашем случае. Для практической формы водослива она получает вид:

$$m_H = 0,797 \left(0,605 + \frac{1}{1,125H - 3} + \frac{0,08 \cdot 1,125H}{W - 0,125H} \right),$$

или

$$m_H = 0,482 + \frac{0,797}{1,125H - 3} + \frac{0,072H}{W - 0,125H}. \quad (2)$$

Последняя для модели дает $m_H = 0,5075$, годный и для природы.

Формула Базена:

$$m_h = \left(0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \left(1 + 0,55 \frac{h^2}{(h+w)^2} \right)$$

проверена в пределах $0,07 < \frac{h}{w} < 2,5$, когда $w = 0,24$ до $0,75$ м и ширина водослива $B = 0,5$ до $2,0$ м.

Для практического профиля формула получает вид:

$$m_H = 1,195 \left(0,405 + \frac{0,003}{1,125 H} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{1,125 H}{1,125 H + W - 0,125 H} \right)^2 \right],$$

или

$$m_H = m = \left(0,484 + \frac{0,0032}{H} \right) \left[1 + 0,6965 \left(\frac{H}{H + W} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Для модели эта формула дает $m = 0,516$, годный и для натуре.

Формула Ханзена

$$m_h = \frac{0,4114}{1 - 0,358 \sqrt{h^3}}$$

проверена при $w = 0,514$, $B = 1,08$ м и $h = 0,05$ до $0,36$ м и для практического профиля получает вид:

$$m_H = \frac{0,492}{1 - 0,4275 H^{3/2}}. \quad (4)$$

Для модели она дает коэффициент $m_H = 0,509$, по законам подобия годный и для натуре.

Формула Фрезе:

$$m_h = \left(0,410 + \frac{0,0014}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h + w} \right)^2 \right]$$

годна при $w = 0,25$ до $1,0$; $h = 0,1$ до $0,6$ м и для практического водослива дает:

$$m_H = 1,195 \left(0,410 + \frac{0,0014}{1,125 H} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{1,125 H}{1,125 H + W - 0,125 H} \right)^2 \right],$$

или

$$m_H = \left(0,490 + \frac{0,00148}{H} \right) \left[1 + 0,696 \left(\frac{H}{H + W} \right)^2 \right], \quad (5)$$

каковая для модели дает $m_h = 0,516$.

Формула Кинцера:

$$m_h = \frac{2}{3} \mu = 0,4342 + 0,009 \frac{b}{B} - 0,0777 \frac{h}{h + w}$$

получает для практической формы водослива в условиях плоской задачи вид:

$$m_H = 0,53 - 0,1045 \frac{H}{H + W}. \quad (6)$$

Последняя для модели дает коэффициент $m_H = 0,506$.

Формула Брашмана:

$$m_h = 0,3838 + 0,0386 \frac{b}{B} + \frac{0,00053}{h}$$

проверена в границах

$$\frac{1}{4} > \frac{h}{w} > \frac{1}{5}.$$

Она в случае практического водослива при $b = B$ имеет вид:

$$m_H = 1,195 \left(0,3838 + 0,0386 + \frac{0,00053}{1,125 H} \right),$$

или

$$m_H = 0,505 + \frac{0,000564}{H}, \quad (7)$$

и для модели дает $m_H = 0,508$.

Формула Людина:

$$m_h = \frac{2}{3} \left(0,609 + \frac{0,001}{h - 0,004} \right),$$

$$m_H = 1,195 \cdot \frac{2}{3} \left(0,609 + \frac{0,001}{1,125 H - 0,04} \right),$$

или

$$m_H = 0,4853 + \frac{0,000797}{1,125 H - 0,04} \quad (8)$$

для нашего случая дает $m_H = 0,489$.

Формула Бовина:

$$m_h = \frac{2}{3} \left[0,648 + 0,362 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 + \frac{0,00163}{h} \right]$$

дает для водослива с практическим гребнем:

$$m_H = 1,195 \cdot \frac{2}{3} \left[0,648 + 0,362 \left(\frac{1,125 h}{H+W} \right)^2 + \frac{0,00163}{1,125 H} \right],$$

или

$$m_H = 0,516 + 0,365 \left(\frac{H}{H+W} \right)^2 + \frac{0,001153}{H}, \quad (9)$$

что дает для нашей модели $m_H = 0,535$.

Формула Борнемана:

$$m_h = 0,5673 - 0,1239 \sqrt{\frac{h}{h+w}}$$

годна при $2 h < w$,

$$m_H = 0,678 - 0,1481 \sqrt{\frac{1,125 H}{H+W}},$$

или

$$m_H = 0,678 - 0,1571 \sqrt{\frac{H}{H+W}}, \quad (10)$$

что дает $m_H = 0,604$.

Формула Ненько:

$$m_h = \frac{2}{3} \mu \frac{1}{\sqrt{5,835 - 4,308 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2}}$$

преобразуется в

$$m_H = \frac{0,512}{\sqrt{1,068 - \left(\frac{H}{H+W} \right)^2}} \quad (11)$$

и для Днепровского водослива дает $m_H = 0,474$.

Приведенные результаты подсчетов коэффициента модели Днепровской плотины, коей $\frac{H}{W} = 0,29$ и $H = 0,179$, подсчеты по тем же формулам коэффициента днепровского водослива в натуре и подсчеты коэффициента для профиля при $\frac{H}{W} = 0,655$, $H = 5,0$ м и модель которого нами испытана в лаборатории, дали:

ТАБЛИЦА 36

	Модель $\frac{H}{W} = 0,29$	Натура $\frac{H}{W} = 0,29$	Натура $\frac{H}{W} = 0,655$	Примечание
По формуле швейцарских инженеров и архитекторов	0,511	0,509	0,539	
" " Ребока	0,5075	0,5114	0,533	
" " Базена	0,516	0,5015	0,537	
" " Хавзена	0,509	Отрицат.	Отрицат.	
" " Фрезе	0,516	0,5075	0,544	
" " Кинцера	0,506	0,506	0,489	
" " Брашмана	0,508	0,505	0,505	
" " Люлина	0,489	0,4855	0,485	
" " Бовина	0,535	0,535	0,574	
" " Борнемана	0,604	0,604	0,579	
" " Ненько	0,474	0,474	0,537	
Опытный коэффициент модели	0,500 ¹	—	0,490 ¹	¹ Без введения тарифировочной поправки
Опытный коэффициент модели	0,509 ²	—	0,499 ²	² С учетом поправки

Судя по этим данным, можно сказать, что:

1) Коэффициенты полученные в лаборатории для моделей при $\frac{H}{W} = 0,29$ 0,655, не преувеличены.

2) Формулы Бовина и Борнемана, давая чрезмерно высокие коэффициенты, едва ли могут найти применение при подсчете коэффициентов расхода водосливов.

3) Формула Ханзена неприменима для практики как формула неправильная по структуре, как формула, идущая вразрез с законами подобия. Для водосливов природы она дает отрицательные коэффициенты.

4) Формулы швейцарских инженеров и архитекторов Ребока, Базена и Фрезе для модели и природы дают различные коэффициенты расхода, не согласуются с законами подобия (особенно формулы Фрезе и Базена). Эти формулы дают чрезмерно высокие коэффициенты водосливов, для кото-

рых $\frac{H}{W}$ велико.

5) Формула Людина не обладает достаточной чувствительностью и дает почти постоянный коэффициент. В наших случаях она его преуменьшает.

6) Формула Ненько, как видно, также не дает результатов, согласных с экспериментами.

7) Формулы Кинцера и Брашмана дают наиболее близкие к нашим экспериментальным данным результаты, и так как формула Брашмана не учитывает законов подобия, формулу Кинцера можно считать наиболее удовлетворительной.

Последние формулы применены нами для случая $\frac{b}{B} = 1$.

В случае если профиль водослива значительно деформирует переливающуюся через базеновский водослив струю, тогда соотношение $m_H = 1,195 m_h$ может претерпеть значительное изменение. Коэффициент 1,195, по данным Негмапек'а, может получить значение до 1,22—1,28, по данным Gravelius'a — от 1,125 до 1,31. Коэффициент при m_h , больший, нежели 1,195, будет, очевидно, соответствовать водосливу с круговым или эллиптическим очертанием оголовка по Реббоку (с большим вакуумом за гребнем), коэффициент меньший — профилю, более полному, нежели кригеровский. По этой же причине по приведенным формулам, нельзя определять коэффициент расхода для напоров меньше расчетного.

Отношение толщины струи e_0 на гребне водослива к напору с учетом скоростного H по данным вышеперечисленных опытов, составляет:

При расчетном напоре . . . $e_0 = 0,758 H$

„ напоре 0,86 $H_{расч}$. . . $e_0 = 0,754 H$

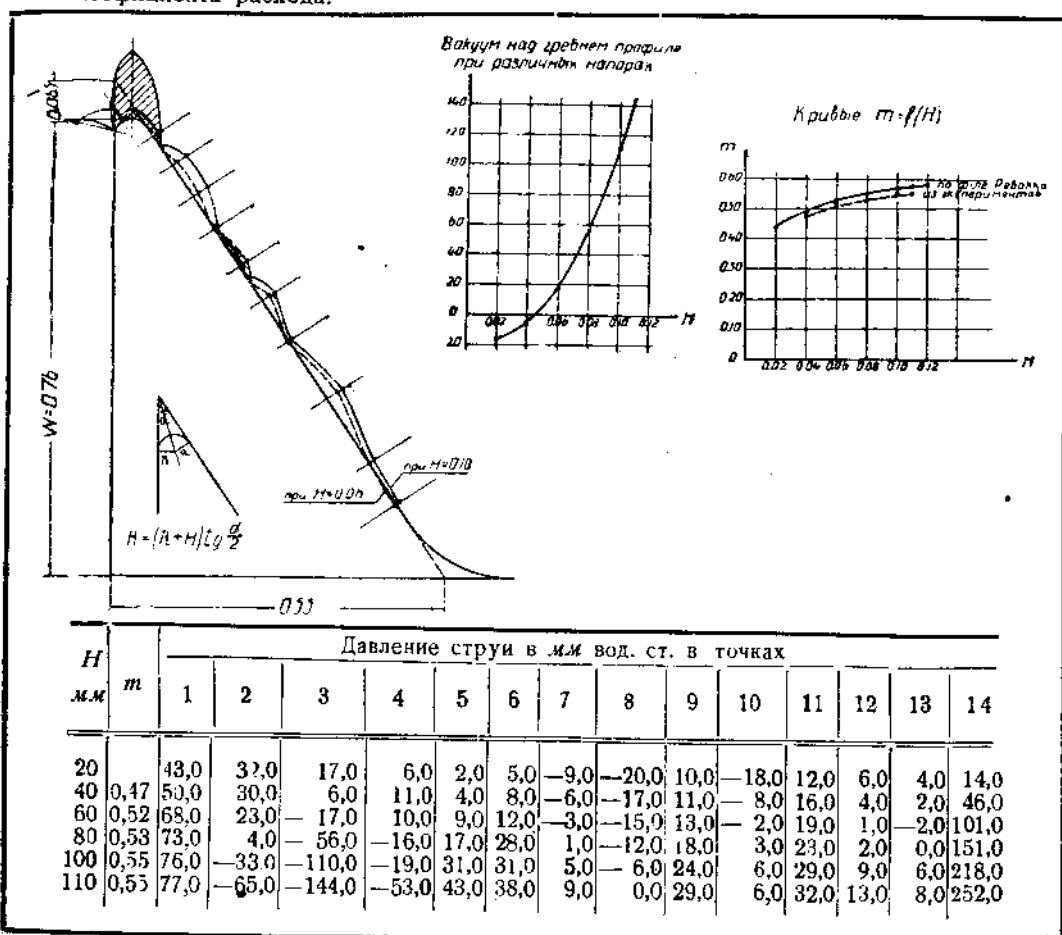
„ напоре 0,725 $H_{расч}$. . . $e_0 = 0,752 H$

при отклонении от этих средних значений на отдельных профилях максимум на 1,0%. Последние цифры до некоторой степени подтверждают устойчивость коэффициента при m_h ($m_H = 1,195 m_h$) в границах произведенных нами видоизменений профиля, а с этим и возможность пользования формулами острогребенчатого водослива для водосливов с практическим профилем.

Испытания в условиях плоской задачи, кроме вышеперечисленных, были произведены в отношении профиля Реббока и профиля существующей плотины Крибштейн. Первое из них было произведено с целью установить порядок величины вакуума для этого профиля; второе — с целью установить, какой же величины вакуум допускают в настоящее время строители.

37. Испытание профиля Ребокка

Высота модели $W=0,76$ м; длина модели по гребню 0,50 м; низовой откос 3:2; расчетный напор $H=0,065$ м; радиус закругления гребня 0,281 м. Форма профиля представлена на фиг. 43, где даны также и результаты испытаний в отношении давления переливающейся струи и в отношении коэффициента расхода.



Фиг. 43. Данные испытаний профиля Ребокка.

Из фиг. 43 следует, что, как и во всех предыдущих опытах, с ростом напора давление струи возрастает на напорной и сливной частях профиля и убывает в оголовке; что вследствие большого вакуума и отсюда значительной деформации струи кривая давления волнообразна и предрасполагает профиль к вибрации. Максимальная величина вакуума при расчетном напоре 0,065 м — 25 мм вод. ст.¹, при повышенных напорах ва-

¹ По опытам проф. Коха и проф. Ахутина минимум давления располагается несколько ниже гребня водослива.

куум сильно возрастает, и при $H=0,11$ м он достигает 144 мм. Струя при этом прилипла и устойчива.

Коэффициент расхода при H_p оказался равным 0,51, или примерно на 2% выше того, что нами получен от безвакуумного профиля. При подсчете коэффициента по формуле Ребокка

$$m_H = m = \frac{2}{3} \left(0,312 + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(5 - \frac{H}{R} \right)^2} + 0,09 \frac{H}{W} \right)$$

он должен быть равным 0,53. Еще без отрыва струн от кладки коэффициент мог получить значение 0,555 по данным экспериментов и около 0,585 по данным подсчетов по приведенной формуле. Разница в коэффициентах по формуле и из экспериментов в среднем составила 3,4%, а если учесть нашу тарифовочную кривую водослива, то только $3,4 - 1,8 = 1,6\%$. Возможно, что и здесь сказалась немоделируемость атмосферного давления, хотя наши условия экспериментов были довольно близки к ребокковским.

Профиль водослива по Ребокку, приведенный на фиг. 43, имеет низовой откос 3:2, вершину наименьшего угла при продолжении граней на отметке максимально расчетного горизонта воды. Этот профиль по сравнению с профилями, предлагаемыми другими авторами, обладает наименьшим сечением. Радиус закругления гребня профиля — хотя Ребокк и говорит о возможности выбора его — может быть лишь единственным для данного способа построения.

В самом деле, по фиг. 43

$$R = (R + H) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

или

$$R \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) = H \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

или

$$R = H - \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{H}{\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - 1},$$

и, стало быть, для оголовков круглого очертания:

$$\begin{aligned} m &= \frac{2}{3} \left(0,312 + \sqrt{0,30 - 0,01 \left[5 - \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - 1 \right)^2 \right]} + 0,09 \frac{H}{W} \right) = \\ &= \frac{2}{3} \left(0,312 + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(6 - \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right)^2} + 0,09 \frac{H}{W} \right). \end{aligned}$$

При низовом откосе 3:2; $\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{3}$, $\alpha = 33^\circ 40'$

$$\frac{\alpha}{2} = 16^\circ 50' \text{ и } \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} = 3,315,$$

$$\begin{aligned}
 \text{а тогда } m &= \frac{2}{3} \left(0,31 + \sqrt{0,30 - 0,01 \cdot 2,685^2 + 0,09 \frac{H}{W}} \right) = \\
 &= \frac{2}{3} \left(0,312 + \sqrt{0,30 - 0,0721 + 0,09 \frac{H}{W}} \right) = \\
 &= \frac{2}{3} \left(0,78 + 0,09 \frac{H}{W} \right),
 \end{aligned}$$

или окончательно

$$m = 0,526 + 0,06 \frac{H}{W}.$$

Такой вид может иметь формула Ребокка для определения коэффициента расхода при $H_{расч}$. Радиус — единственный для данного положения низового откоса, характеризующего минимум сечения профиля. При сдвиге откоса в нижний бьеф радиус будет иной и иной коэффициент расхода.

По нашему мнению ребокковские коэффициенты расхода на практическом водосливе недостижимы за невозможностью моделировать атмосферные давления. К сожалению, нам не удалось поставить опытов с более крупными моделями водосливов, не удалось, вместе с этим, установить закономерностей в изменении коэффициента расхода и давления струи с изменением масштаба вакуумного профиля.

38. Испытания профиля плотины Крибштейн

Плотина Крибштейн была построена в Германии в 1929 г. Ее профиль заведомо вакуумный. Уравнение профиля: $x^2 = 1,8 H y$ при $H = 4,0$ м и при вершине параболы на напорной грани (фиг. 44).

По испытании профиля водослива на модели при $\lambda = 50$ (1:50) коэффициент расхода оказался равным при расчетном напоре 0,46; профиль оказался вакуумным. Вакуум наибольшей величины обнаружен на гребне профиля. При $H = 4,0$ м он составил 20 мм вод. ст. или, при линейном пересчете его, в натуре $20 \text{ мм } 50 = 1,0$ м.

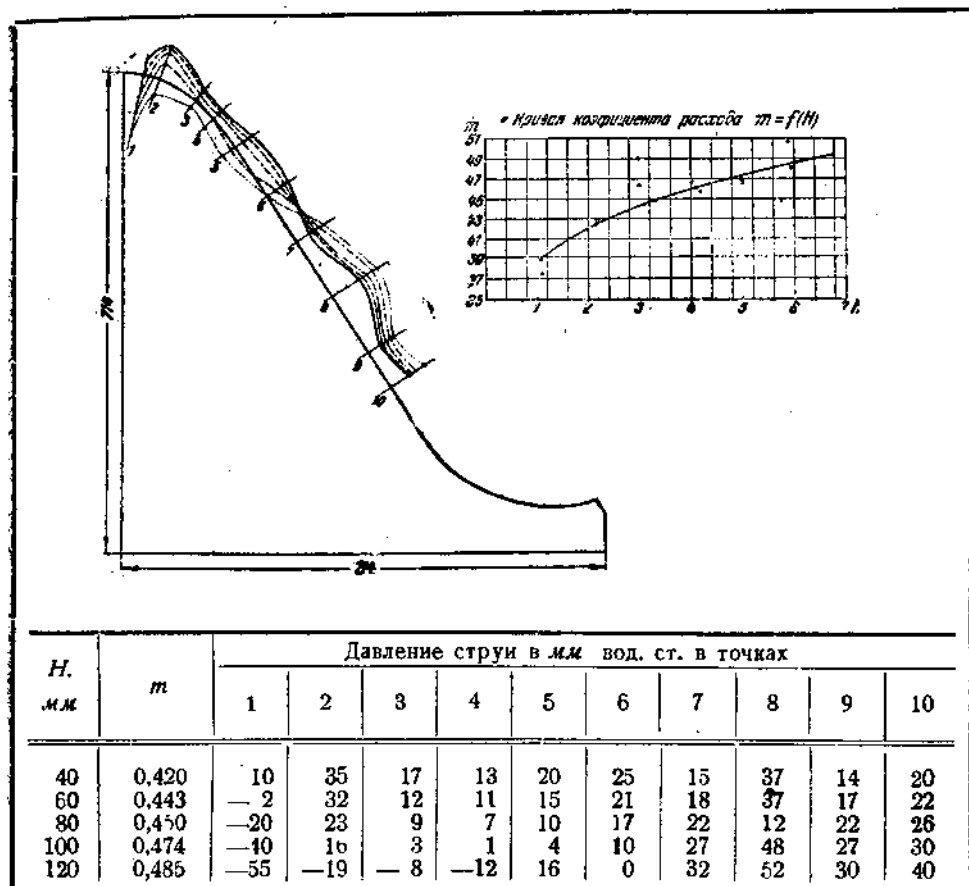
Нам неизвестно, испытывался ли в лаборатории профиль плотины Крибштейн, но и без испытаний можно было сказать, что он будет вакуумным. Вакуум здесь оказывает не опрокидывающее, а взвешивающее действие; он опасен здесь, как и вообще во всех случаях, в смысле коррозии и вибрации. Строители плотины пренебрегали вакуумом.

39. Испытание водосливов в условиях пространственной задачи

Под испытаниями водосливов в условиях пространственной задачи мыслится испытания, в которых на переливающуюся через водослив струю оказывается боковое воздействие или воздействие со стороны бычков. В нашем случае эти испытания производились над одним пролетом плотины, ограниченным полубычками, и соответствовали в натуре случаю перелива струи через прямолинейную плотину, расположенную нормально к оси потока, при всех открытых затворах. В ГЭИ были испытаны в таких условиях профиля;

1ЛЦ; 2ЛЦ; А; несколько видоизмененный профиль С под маркой С' и два криверовских: один из них при $\frac{H}{W} = 0,260$ и другой при $\frac{H}{W} = 0,327$.

В отношении давления струи эти испытания показали, что наличие быч-



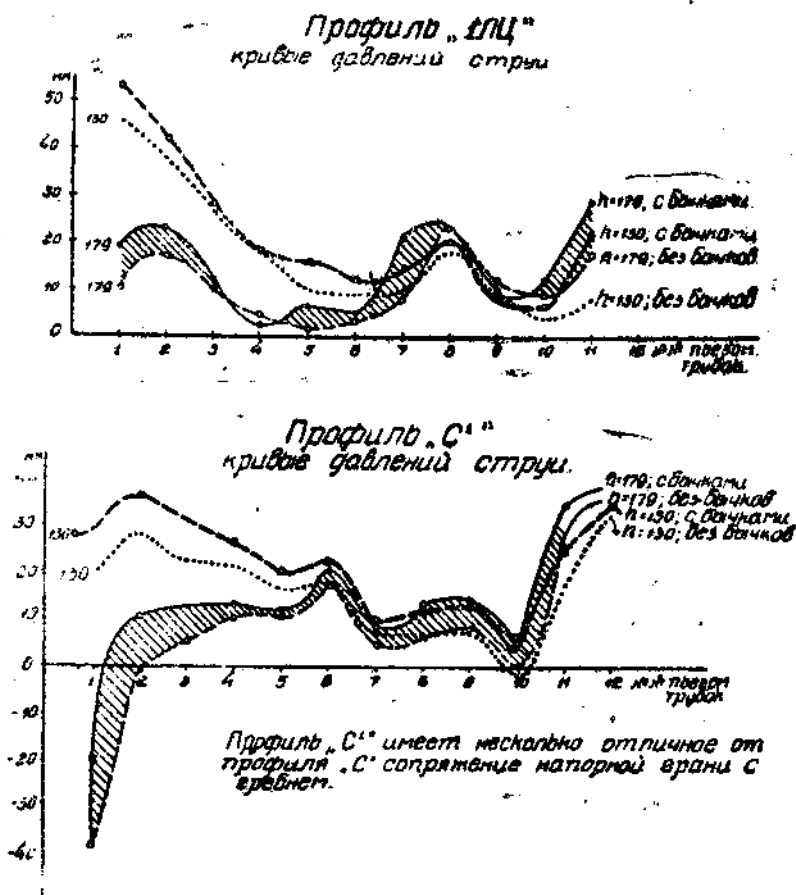
Фиг. 44. Данные испытаний модели плотины Кривштейн

ков вызывает возрастание давления струи и тем большее, чем больше отношение $\frac{H}{b}$, в котором H — расчетный напор и b — расстояние между бычками.

Наличие пазов действует также в сторону возрастания давления струи. Для моделей 1ЛЦ и С', испытанных в условиях плоской и пространственной задач, развернутые кривые давления струи представлены на фиг. 45. Из этих кривых явствует, что профиль K_6 , вакуумный в условиях плоской задачи, будет безвакуумным в условиях задачи пространственной, если $\frac{H}{b}$ будет иметь то же значение, что и в случае профиля С' или 1ЛЦ. Но профиль K_6 имеет примерно на 1% меньшую площадь, чем она у профиля

Кригера, и потому он обладает в этих условиях преимуществом перед последним.

Стало быть, для плотин с затворами, для которых, как в днепровских условиях, $\frac{H}{b} = \frac{9}{13} \approx 0,7$, может быть рекомендован безвакуумный в услови-



Фиг. 45. Кривые давлений струи.

ях пространственной задачи профиль K_4 . Если для какой-либо плотины величина $\frac{H}{b} > 0,7$, для нее могут быть применены на 1,5—2,5% более экономичные по кладке профиля C и K_4 .

Возрастание давления струи, как видно из фиг. 45, происходит по всему профилю, и внизу сливной части оно устраняет повод к возникновению вакуума при переливе струи под пониженными напорами над гребнем.

Из экспериментов с одним пролетом плотины, когда последний ограничен по концам полубычками, обнаружилось более или менее значительное сни-

жение коэффициента расхода. Так, в случае моделей днепровских, для которых $\frac{H}{b} = 0,69$ и длина пролета в свету $b = 0,260$ м, толщина полубычка $0,0325$ м, при расчетном напоре снижение коэффициента выразилось 2% по отношению к плоской задаче (вместо $0,50-0,49$ в среднем). При напорах меньше расчетного степень снижения коэффициента примерно сохранялась.

В профилях кригеровских (опыты Бугэса) при соотношении $\frac{H}{b} = 0,82-0,85$ и при тех же условиях эксперимента снижение коэффициента расхода при расчетном напоре достигло уже $4,8\%$. Вместо $0,498-0,474$ для профиля при $\frac{H}{W} = 0,260$ и вместо $0,495-0,470$ для профиля при $\frac{H}{W} = 0,327$. Очевидно, при возрастании величины $\frac{H}{b}$ процент снижения коэффициента стал бы также возрастать и в степени выше первой. По Фрезе уменьшение коэффициента расхода в зависимости от отношения $\frac{b}{H}$ происходит следующим образом:

ТАБЛИЦА 37.

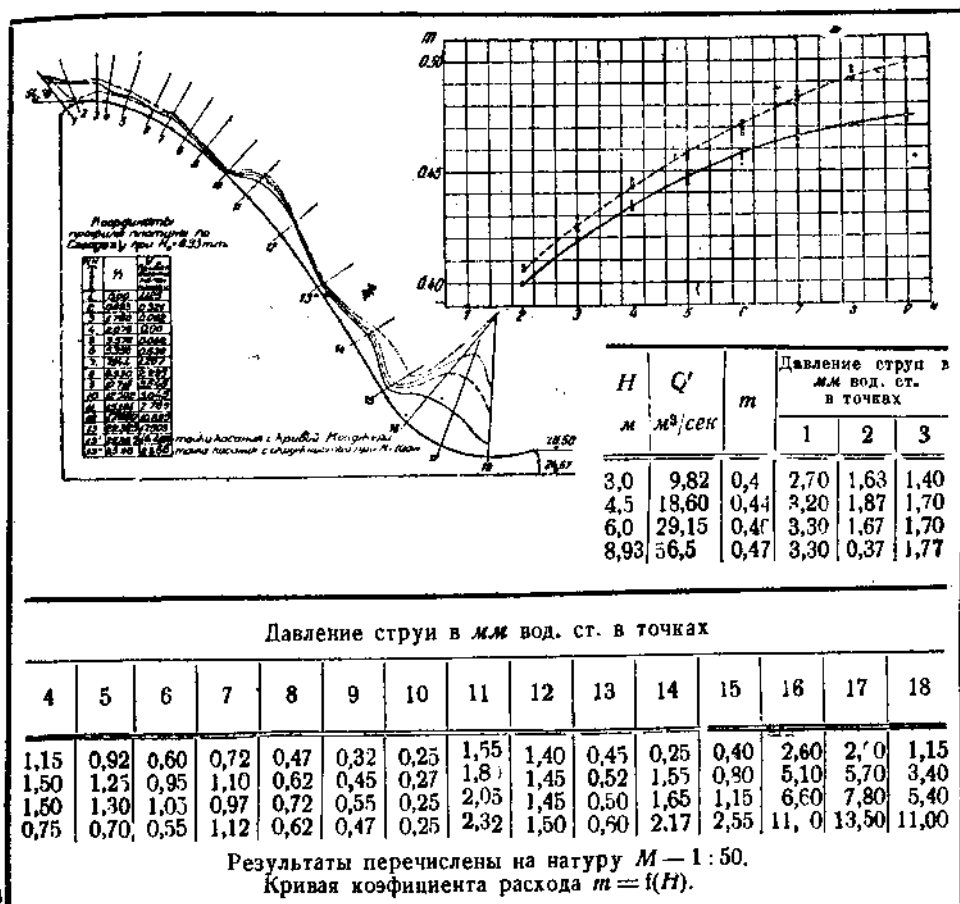
$\frac{H}{b}$	1,000	0,500	0,333	0,250	0,200	0,167	0,100	0,05
Коэффициент влияния быч- ков	0,846	0,910	0,937	0,950	0,960	0,965	0,978	0,988
$\frac{b}{H}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	10,0	20,0

Данными Фрезе, однако, пользоваться не следует, ибо ни один из наших опытов не согласуется с ними. Мы имеем для днепровских моделей при $\frac{H}{b} = 0,7$ коэффициент влияния бычков $0,98$; для бугских моделей при $\frac{H}{b} = 0,82-0,85$ коэффициент влияния бычков $0,962$ вместо $0,875$ по Фрезе. Коэффициент влияния бычков не может быть достаточно надежно определен и данными Френсиса.

Коэффициент будет, очевидно, в сильнейшей степени зависеть от формы бычков, от способа размещения их на теле плотины, от количества, размеров и размещения пазов. Эта область требует широко поставленных экспериментов.

Ход кривых $m = f(H)$ для одной и той же модели при работе ее в условиях плоской и в условиях пространственной задачи ($\frac{H}{b} = 0,85$) иллюстрирует фиг. 46.

Коэффициенты расхода в условиях пространственной задачи в зависимости от скоростей подхода изменяются в весьма широких пределах. Так, при испытании в натуре плотины Кеокук, которой $H_{рас} = 3,35$ м; $b = 9,64$ м; $\frac{H}{W} = 0,367$ и $\frac{H}{b} = 0,367$, толщина бычка 1,83 м, число пролетов 119 и про-



Фиг. 46. Данные испытаний профиля Кригера в условиях пространственной задачи

филь, близкий к испытанным нами, установлено при измерении расходов только в пролете 68, что:

при чаноре 3,31 м, когда открыт только пролет № 68 $m = 0,466$
 " " 3,305 " " пролеты № 68 и 69 $m = 0,466$
 " " 3,28 " " " № 67; 68 и 69 $m = 0,471$
 " " 3,24 " " " № 67; 68 и 70 $m = 0,471$
 " " 3,295 " " " № 68; 71 и 72 $m = 0,463$
 " " 3,35 " " " № 65; 66 67; 68;
 69; 70 и 71 $m = 0,486$

Для подсчета коэффициента расхода плотины, имевшей глухие боковые крылья, или плотины, работающей при закрытых боковых пролетах, кроме формулы Кинцера и Брашмана существует формула Хегли (видоизмененная формула Базена). Ее вид для острогребенчатого водослива:

$$m_h = \left[0,405 + \frac{0,0027}{h} - 0,03 \frac{B-b}{B} \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right],$$

где B — длина плотины;

для водосливов с практическим профилем:

$$m_H = m = 1,195 \left[0,405 + \frac{0,024}{H} - 0,03 \frac{B-b}{B} \right] \times \\ \times \left[1 + 0,696 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{H}{H+w} \right)^2 \right].$$

Для одного работающего пролета кеокукской плотины формула дает:

$$m_H = 1,195 \left[0,405 + 0,00073 - 0,03 \frac{119(9,64 + 1,83) - 9,64}{1360} \right] \times \\ \times \left[1 + 0,696 \left(\frac{9,64}{1360} \right)^2 \left(\frac{3,31}{12,95} \right)^2 \right] = 0,45.$$

Формула Хегли, как видно, дала преуменьшенный коэффициент.

Из американских испытаний модели из нескольких пролетов плотины Кеокук в масштабе 1:11 при расчетном напоре получены коэффициенты:

при открытом одном		
водосливе	$m = 0,46$	против 0,466 для натуре;
при открытых всех		
пролетах	$m = 0,476$	против 0,486 для натуре
		(7 пролетов)
без бычков	$m = 0,487$	

В случае Кеокука степень снижения коэффициента расхода в условиях пространственной задачи по сравнению с задачей плоской выразится:

$$\frac{0,487 - 0,476}{0,487} 100 = 2,26\%.$$

что надо считать несколько великоватым для $\frac{H}{b} = 0,367$ и объяснить плохой обтекаемостью бычков. Величина коэффициента расхода, полученная из испытаний плотины Кеокук в модели и в натуре для случая, соответствующего нашим опытам, как видно, довольно близка к нашим результатам.

В отнесении влияния бычков мы в результате имеем:

ТАБЛИЦА 38

	m плоской задачи	m пролета с полу- бычками	$\frac{H}{b}$	По Фрезе	
				Коэффициент влияния бычков	Коэффициент расхода
Для профилей днепров- ских (модель)	0,500	0,490	0,70	0,885	0,443
Для профилей кригеров- ских (модели Бутгас) . . .	0,495	0,470	0,84	0,867	0,423
Для Кеокука—(модель) . . .	0,487	0,476	0,37	0,925	0,45
„ „ — (натура)	—	0,486	—	—	—

Модельные испытания профиля Кеокук дали, по сравнению с натурой, коэффициент для одного пролета при закрытых соседних на 1,3% ниже и для одного пролета при открытых смежных на 2,05% ниже, чем дала натура. По аналогии в условиях плоской задачи профиль Кеокук в натуре должен в таком случае дать коэффициент 0,50.

Подсчеты коэффициента в условиях плоской задачи для этой плотины дают:

ТАБЛИЦА 39

По формуле швейцарских инженеров и архитекторов	$m = 0,512$
„ „ Ребока	$m = 0,510$
„ „ Базена	$m = 0,511$
„ „ Фрезе	$m = 0,516$
„ „ Кинцера	$m = 0,502$
„ „ Брашмана	$m = 0,505$
„ „ Борнемана	$m = 0,596$
„ „ Бовина	$m = 0,543$

Здесь формулы Борнемана и Бовина, как и в первом подсчете, дают явно преувеличенные результаты, а формула Кинцера — результаты, наиболее близкие к действительности.

40. Испытание водосливов при неполном открытии затвора

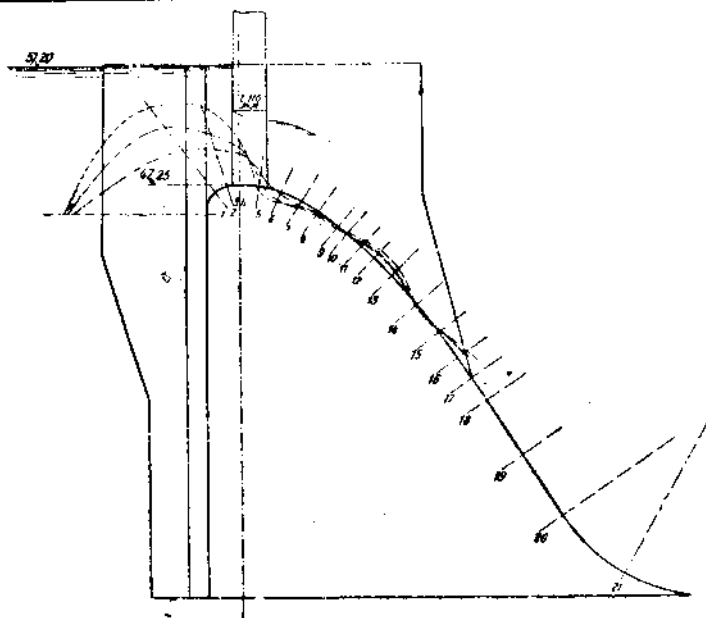
При истечении из-под щита на теле плотины за секущей кромкой, независимо от полноты практического профиля, возникает вакуумная область. Ниже, на кривой слива, последняя сменяется областью с положительным давлением струи, а еще ниже область с положительным давлением струи сменяется вновь участком вакуумным, как это видно из фиг. 47.

Волнообразный ход кривой давления распространяется дальше или ближе в зависимости от длины водосливной линии, от напора и от толщины истекающего слоя. Величина и распространенность вакуума в последующих волнах всегда оказывается меньше чем в предыдущей. В зависимости от открытия затвора положение вакуумных участков несколько сдвигается в ту или иную сторону по профилю.

Для суждения о величине вакуума за частично открытым щитом приведем здесь таблицу давления струи при истечении под различными напорами при

различных открытиях щита. Таблица IV в конце текста получена при экспериментировании моделей по заданию Днепростроя.

Из последней следует, что максимальный вакуум имеет место при открытиях щита от 2,5 до 5,0 мм в точке, располагающейся примерно на 15 мм ниже секущей кромки. Его величина в наилучших условиях работы плотины 175 мм вод. ст., или для натуре около 8,75 м. Нижняя грань ребра имела



e	Давление струи при напоре $H = 175$ мм и открытии щита e мм в точках														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
110	0,5	51,8	58,5	47,5	18,5	-4,0	6,5	-4,0	-1,0	0,5	10,0	15,0	15,5	-0,5	5,5
70	2,0,5	124,0	80,5	59,	9,5	-14,5	-11,0	-8,0	-4,0	-1,5	9,0	11,0	11,5	-3,5	4,5
40	211,5	163,0	125,5	167,5	-5,5	-18,5	-8,0	-2,0	-1,0	-0,5	5,0	7,0	8,5	-3,5	3,5

Масштаб модели 1:50.

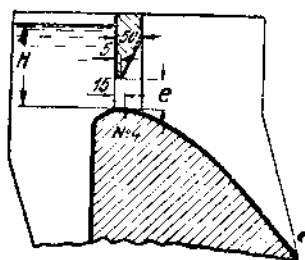
Фиг. 47. Данные испытаний профиля 2ЛЦ при частичном открытии щита.

при этом ширину равную 50 мм. При нижней грани шириной в 5 мм (вместо 50) вакуум в точке 4 уменьшился до 4,5 мм в модели (фиг. 48). Очевидно, вакуум в 175 мм в этом случае или сместился вверх, ближе к секущей грани, или он просто исчез от сокращения ширины нижней грани щита, от устранения повода к прижиму струи к этой грани.

При испытании профилей 2ЛЦ, С и А вакуум в 175 мм вод. ст. обнаружен не был ни при каких условиях. Максимальный вакуум до 15 мм вод. ст. в этих опытах обнаружился при открытиях, равных примерно одной трети напора. Возможно, что причиной „исчезновения“ вакуума в 176 мм здесь явилось несколько иное расположение пьезометрических трубок по отно-

шению к широкой 50-мм нижней грани щита. Вероятно также, что явление прилипания струи к нижней грани щита—явление неустойчивое, переходящее.

При весьма медленном закрытии щита в некоторых случаях удавалось довести шель над профилем 1ЛЦ до 2,5—5 мм при вакууме в точке 4 не более 3—4 мм вод. ст.



Фиг. 48.

Во всяком случае, опыты эти показывают, что наличие широкой нижней грани щита может в начальный момент подъема сделать необходимым увеличение подъемного усилия на 5—8 т на кв. метр поверхности нижней грани. В случае профиля 1ЛЦ, если вакуум смоделировать линейно и если нижнюю грань щита считать плоской, добавочное подъемное усилие в начальный момент подъема выразится $8,75 \cdot 13 \times 0,5 = 57$ т. Для уменьшения подъемного уси-

лия в ряде случаев было бы целесообразно в нижнем ригеле устраивать отверстия для подвода к струе воздуха. Это вместе с тем поведет и к ослаблению вибраций щита в начальный момент его подъема.

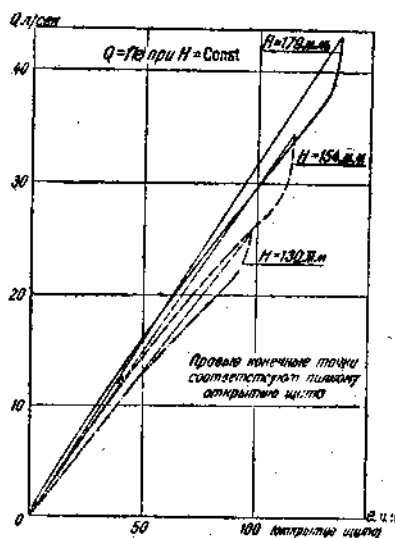
При любом открытии щита на профиле возникнут вакуумные участки.

Зависимость между расходом воды и открытием щита может быть охарактеризована фиг. 49. Как нетрудно заключить из последней, коэффициент истечения с изменением открытия изменяется. Он больше при небольших открытиях затвора, когда проявляется подсосывающее действие вакуума, и меньше при открытиях больших, когда подсосывающей силы становится недостаточно для прижима к телу плотины уже более мощной струи.

41. Пульсация давления струи

При переливе струи через водослив при всех возможных условиях работы этого водослива давление струи не остается в каждой данной точке по времени постоянным, а, как показали опыты, пульсирует. Эти пульсации происходят на всем профиле примерно с одинаковой частотой, но при различных амплитудах. Наибольшая амплитуда колебаний обнаруживается на сопрягающей профиль с нижним бьефом кривой. Меньше она на сопряжении напорной грани с гребнем профиля, незначительна — на сливной части и ничтожно мала — на напорной грани.

Пульсация давления струи имеет место и на водосливах наших гидростанций и в частности на днепровском, где она фиксирована нами по изменению толщины переливающейся струи вблизи бычков плотины, по периодическому изменению характера потока за плотиной.



Фиг. 49.

Толщина переливающейся струи периодически изменяется и в модели, но в весьма небольших пределах.

По данным модельных испытаний частота пульсаций довольно приближенно может быть оценена 60 в минуту; максимальная амплитуда колебаний давления на сопрягающей гребень водослива кривой — 30 мм; на кривой, сопрягающей профиль с дном со стороны нижнего бьефа, — 75 мм и на вертикальном сопрягающем уступе, в некоторых случаях, до 150 мм, все при $H = 179$ мм.

Инерция массы жидкости внутри пьезометрических трубок, надо сказать, значительно снизила амплитуду этих колебаний и несколько нарушила частоту гармоник. Для испытания профиля Днепровской плотины в натуре нами предусмотрены, кроме пьезометров, безинерционные приборы для записи изменений давления струи на профиль и для записи вибраций щита и тела плотины.

42. Шероховатость и неровности поверхности плотины, давление струи и коэффициент расхода

С увеличением шероховатости водослива давление переливающейся струи возрастает. Это было обнаружено из экспериментов на моделях профилей К и профиля 2ЛЦ, коих поверхность в одном случае была шлифованной металлической, в другой она была покрыта весьма тонким слоем песка. Это было обнаружено, правда, косвенно, через коэффициент расхода, и на модели в 1:11 натуральной величины Кеокукской плотины, поверхность которой в одном случае была выполнена из красного дерева и затем отшлифована и отполирована; в другом случае она была покрыта по красному дереву шеллаком и в третьем, кроме того, и песком (американские опыты).

При опытах в запас положительного давления следует пользоваться моделью с идеально гладкой поверхностью.

В зоне общего положительного давления струи каждая выступающая частичка непременно все же образует за собой вакуумный участок и вызывает явление коррозии. Поэтому и поверхность водослива в натуре целесообразно выполнять как можно более ровной, гладкой.

Для суждения о действии неровностей и шероховатости поверхности могут представить интерес нижеследующие данные, взятые из наших опытов по определению рационального сопряжения Днепровской плотины с нижним бьефом. Опыты эти производились на описанных здесь моделях водосливов, у которых изменялись радиусы сопрягающей дуги и высоты уступа. Во всех случаях сопряжений предполагалось, что оно будет ограничиваться со стороны нижнего бьефа вертикальной стенкой той или иной высоты.

При одном и том же сопрягающем устройстве, но при различных высотах порога на модели нами было получено:

при пороге высотой	2 см	— вакуум от 36 до 46 мм вод. ст.
• • •	6 „	— „ „ 16 до 36 „ „
• • •	12 „	— „ „ 16 мм вод. ст.

другом случае:

при пороге высотой	2 см	— вакуум между 74—79 мм
• • •	4 „	— „ „ 34—54 „

При одном и том же пороге, в зависимости от скорости схода воды с порога:

в одном случае (порог высотой 8,0 см):

при скорости	3,96 м	— вакуум	52 мм
"	"	3,90 "	— " 47 "
"	"	3,84 "	— " 32 "

в другом случае (при высоте порога 4,25 см):

при скорости	3,96 м	— вакуум	34—54 мм
"	"	3,93 "	— " 24—49 "
"	"	3,90 "	— " 14—44 "

Мы не рискуем экстраполировать эти данные на натуру, но все же из них допустимо заключить, что:

1) явление кавитации будет сказываться с особой силой в области больших скоростей струи;

2) небольшие (до каких-то пределов) неровности, по всей вероятности, будут вызывать более сильную кавитацию.

Кроме подтверждения той мысли, что поверхность плотины должна быть выполнена возможно более гладкой, отсюда выявляются и преимущества высоких порогов сопряжения перед низкими (пример — разрушения за Вильсоновской плотиной при низком пороге).

Таким образом шероховатость и неровности, увеличивая общее давление струи, проедают зоны местного вакуума, иногда более напряженного, интенсивного.

При шероховатой и неровной поверхности плотины коэффициент расхода несколько снижается. Это снижение коэффициента мы в наших опытах не уловили; оно было ничтожным и за пределами точности опытов.

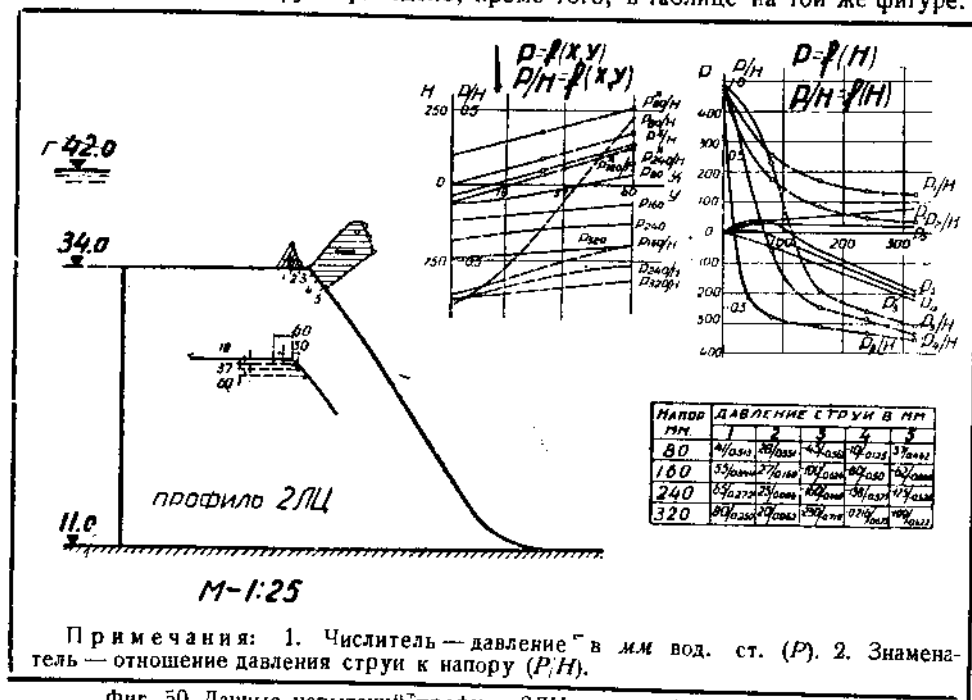
43. Испытание профиля плотины, не доведенной до нормальной отметки гребня

В заключение обзора экспериментов с профилями водосливов в условиях плоской и в условиях пространственной задачи приведем данные испытаний профиля 2ЛЦ или профиля Днепровской плотины, когда последний возведен не на полную высоту. Эти данные представляют интерес для тех случаев практики, когда постройка плотины, как и на Днепрострое, производится по методу „гребенки“.

На фиг. 50 представлен профиль плотины ДнепроГЭС (сопряжение с нижним бьефом не моделировано; бычки не изображены), гребень которого имеет отметку 34,0 м вместо 42,25 м. Профиль был испытан в лаборатории ГЭИ, при наличии бычков, в 1:25 натуральной величины в отводящем канале турбинного прибора, располагающем расходом свыше 2,0 м³/сек и имеющем сечение 2,0 × 2,0 м.

В соответствии с возможными напорами в действительных условиях работы напор в модели достигал до 320 мм и профиль был испытан при напорах: 80; 160; 240 и 320 мм. При этом струя не отрывалась от тела плотины; была прилипшей.

Давление струи в пяти указанных наиболее интересных точках профиля характеризуется кривыми фиг. 50, кои нами экстраполированы и для напоров от 0 до 80 мм и для положений точек от $y=37$ до $y=0$ и от $x=60$ до $x=0$, если $x=0$ и $y=0$ считать на ребре между точками 2 и 3. Давление струи приведено, кроме того, в таблице на той же фигуре.



Примечания: 1. Числитель — давление в мм вод. ст. (P). 2. Знаменатель — отношение давления струи к напору (P/H).

Фиг. 50. Данные испытаний профиля 2ЛЦ при гребне на отметке 34,0.

Как видно, вакуум за ребром может достигать значительной величины и, при линейном пересчете данных модели на натуру, выражаться величиной порядка 6,0 м вод. ст., или величиной 0,72 $H_{расч}$. Струя, как сообщали нам с ДнепроГЭС, не отрывалась от тела плотины и не давала признаков на прорывы воздухом и на кавитацию. Данных о поведении бетона нам получить не удалось.

Анализ кривых $P = f(H)$; $\frac{P}{H} = f(H)$; $P = f(x; y)$ и $\frac{P}{H} = f(x; y)$,

из-за боязни сделать статью громоздкой, мы предоставляем читателям.

44. Масштаб модели и давление струи

В лабораторной практике принято считать, что давление переливающейся струи на модели в масштабе 1:λ натуральной величины будет в λ раз меньше, нежели в натуре (если $\lambda > 1$), и что линейная зависимость действительная между вакуумом и масштабом модели до той поры, пока при пересчете вакуума модели на натуру он не получился более 10 м вод. ст.

В ряде случаев, и в частности на моделях сифонов ЗаГЭС и КанакиргЭС, мы наблюдали вакуумы, которые при линейном пересчете на натуру выражаются 11—12 м вод. ст. Безусловно в натуре таких вакуумов мы иметь не будем, но вместе с тем, по всей вероятности, не будем мы иметь в натуре и тех коэффициентов расхода, что имели в модели. Коэффициенты в натуре будут также несколько ниже модельных. Каково давление струи, каковы будут коэффициенты в этом случае в натуре? — На это трудно что-либо ответить.

Мало вероятно также полагать, что модели, работающие на принципе подсоса (вакуума), даже в том случае, если вакуум этих моделей, при пересчете на натуру, окажется и менее 10,33 м вод. ст., сохраняют свой коэффициент для натуре, линейно изменят для натуре свой вакуум.

45. Масштаб модели и коэффициент расхода

Вследствие трудностей моделирования шероховатости обычно силы трения и вязкости на модели имеют значительно большее влияние на коэффициент расхода, нежели в натуре. Коэффициент расхода модели всегда, вследствие этого несколько меньше, чем таковой в натуре (кроме случая моделей, действующих на принципе подсоса).

Мы можем в данном случае сослаться на результаты испытаний плотины Кеокук, где получено:

- | | |
|--|--|
| 1) для натуре $m = 0,4860$ | { (открыто семь отверстий); условия испытаний тождественны |
| " модели $m = 0,4760$ ($\lambda = 11$) | |
| 2) " натуре $m = 0,4615$ | { (открыто одно отверстие закрыты смежные) |
| " модели $m = 0,4595$ | |
| 3) " натуре $m = 0,4660$ | { (одно из двух открытых отверстий) |
| " модели $m = 0,4695$ | |

Более показательны в отношении связи $m = f(\frac{1}{\lambda})$ опыты Эсканда с моделями Пюсшабонской плотины, которой $W=103$ м; $H=6,8$ м и $Q=40$ м³/сек на пог. метр. Модели 1:300; 1:150 и 1:100 были изготовлены для опытов из бронзы с точностью до 1:10 мм и отшлифованы; модель 1:19,5 — из бетона. Расход измерялся водомером Вентури, тарированным объемным способом и водосливом Базена.

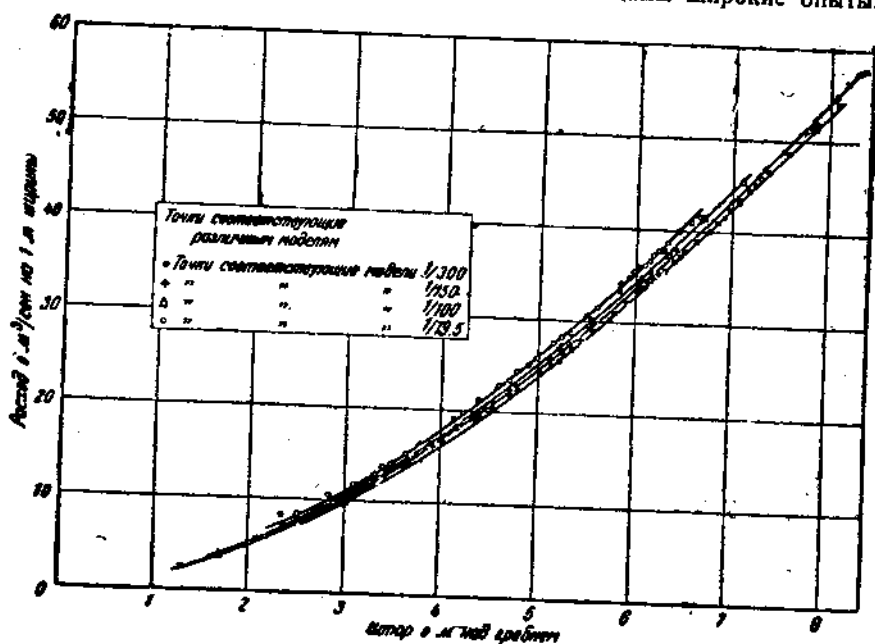
Данные опытов Эсканда приводим на фиг. 51 и в таблице, составленной по фиг. 51 (результаты опытов пересчитаны на натуру).

ТАБЛИЦА 40

H_m	2	3	4	5	6	7
Q м ³ /сек (1:19,5)	—	11,5	18,45	26,8	36,5	47,0
Q " (1:100)	5,4	10,95	17,9	25,9	35,4	46,0
Q " (1:150)	5,05	10,5	17,4	25,5	34,4	45,1
Q " (1:300)	—	10,1	16,5	24,7	33,7	44,0

Интересными данными по этому вопросу располагает проф. Киршмер. Последним опытом были произведены с более крупными моделями водосливов и получены данные, подтверждающие возрастание коэффициента расхода с ростом масштаба модели, но, в отличие от данных Эсканда, Киршмер вместо прямой связи $m = f(\lambda)$ получил эту зависимость криволинейной.

Делать количественные выводы из данных Эсканда и Киршмера пока было бы преждевременным и рискованным. Необходимы широкие опыты.



Фиг. 51.

Во всяком случае, модельные испытания несколько преуменьшают коэффициент расхода, и чем крупнее модель, тем опыт точнее. Только в случае моделей, работающих на вакууме, коэффициент натуре может быть меньше модельного.

46. Заключение по части II

На основании приведенных выше данных является возможным сделать следующие основные выводы:

1. Профиль Бовина под маркой „Б“ со значками; Американской консултации Днепростроя под маркой „А“; смешанный Бовина-Кригера под маркой „БК“ со значками и Сабанеева под маркой „С“ в условиях плоской задачи — профили вакуумные и, за отсутствием преимуществ в смысле коэффициента расхода перед другими, не могут быть применяемы в гидротехнической практике.

2. Профиль 1ЛЦ — безвакуумный, но вследствие чрезмерного сечения также не может быть применяем.

3. Профиль 2ЛЦ — безвакуумный, но за недостаточностью экспериментальной проверки в разнообразных условиях, до прохождения этой проверки, не может быть рекомендован для гидротехнической практики.

4. Профиль Кригера, испытанный в условиях плоской задачи в интервале $0,125 \leq \frac{H}{b} \leq 0,655$, как и на основании аналогий, оказался безвакуумным и может найти себе применение в строительной практике в самых разнообразных условиях.

5. При наличии бычков, если соотношение $\frac{H}{b} = 0,7$ или близко к нему, может быть применен вакуумный, в условиях плоской задачи, профиль K_5 . Если $\frac{H}{b}$ значительно больше 0,7, может быть применен профиль С или K_4 .

Профили K_5 , K_4 и С обладают одинаковым с профилем Кригера коэффициентом расхода и экономичнее последнего по кладке: первый — на 1%, второй и третий — приблизительно на 2%.

6. Как и бычки, шероховатость вызывает общее возрастание давления струи и в этом смысле действует положительно, но она вместе с тем порождает зоны местного вакуума, опасного не в смысле вибрации или в смысле создания опрокидывающей или взвешивающей силы, а в смысле коррозии; вместе с общим возрастанием давления струи коэффициент расхода водослива снижается. Водосливы желательнее осуществлять с гладкой поверхностью.

7. Так как рассмотренные здесь формы водосливного профиля в общем незначительно разнятся от профиля нижней поверхности струи, переливающейся через водослив Базена, является возможным пользоваться для подсчета коэффициента расхода водослива с практическим профилем формулами коэффициента для острогребенчатого базеновского водослива. Как показали наши подсчеты, наиболее близкие к экспериментальным коэффициенты дает формула Кинцера, а наиболее отклоняющиеся результаты — формулы Бовина и Борнемана.

8. При частичном открытии затвора, за секущей кромкой его, на теле плотины непременно возникают вакуум и волнообразный ход кривой давления. Для уменьшения подъемного усилия затвора и для уменьшения вибраций последнего в начальный момент подъема необходимо обеспечить безвакуумность на нижней кромке затвора.

9. Изучение вибраций плотины в будущем надлежит увязать с вопросом о пульсации давления струи. В программы испытаний плотин следует ввести и вопрос о пульсации.

10. Так как лабораторные испытания профилей всегда дают несколько преуменьшенные коэффициенты расхода, целесообразно производить опыты с водосливами в двух-трех различных и притом достаточно крупных масштабах.

ЧАСТЬ III

СОВРЕМЕННЫЕ ФОРМЫ ПРОФИЛЯ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ

47. Вакуумность современных плотин, связанная с конфигурацией их профиля

Задолго до появления гидравлических расчетов и гидравлического эксперимента строились водосливные плотины. Многие из этих плотин, несмотря на очевидную и значительную вакуумность, благополучно существуют по настоящий день, и если некоторые разрушились, то основной причиной разрушения все же, повидимому, не был вакуум. Во всяком случае, в литературных данных вакуум как причина разрушения фигурирует чрезвычайно редко, и разрушения от вакуума, если они имели место, проводятся по графе причин неизвестных, неустановленных. Вакуум, повидимому, является как бы катализатором разрушения: он создает добавочные взвешивающие и опрокидывающие силы, он создает вибрацию сооружения; в случае острой его формы, он вызывает в той или иной мере, в зависимости от материала, из коего построена облицовка плотины, в зависимости от скоростей струи, коррозию тела плотины. Оценки не только количественной, но и качественной действия вакуума в настоящее время в литературе не имеется. Не имеется в литературе и сведений относительно вакуумности современных водосливов.

Как будто впервые мы попытаемся здесь, на основании аналогий, оценить вакуумность современных водосливов, приведя их профили к единичному напору и дав сравнение не только старых, но и новых плотин, так как и последние, будучи построены на основании одного из методов гидравлического расчета, так же, как установлено в предыдущих частях работы, не будут свободны от вакуума.

Для сравнения площадей и оценки вакуумности воспользуемся прежде всего данными, приводимыми в книге Кригера: „Engineering for masonry Dams“, именно фиг. 52, взятой из этой книги.

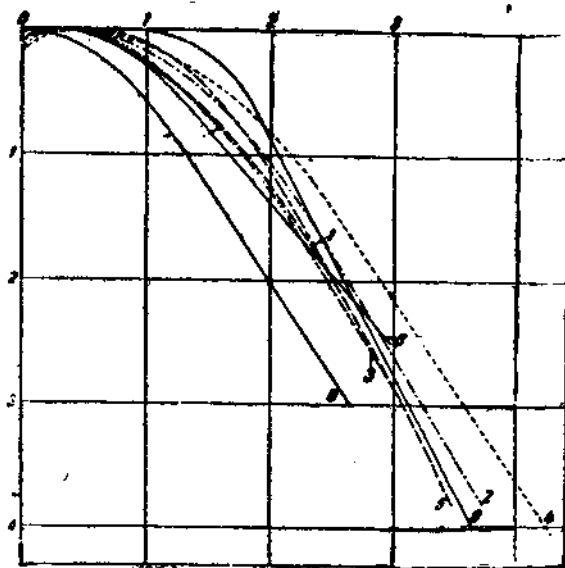
Единичным напором Кригером принят, как видно, напор $H = 10$ футов $\approx 3,048$ м, и к этому напору приведены указанные на фиг. 52 шесть профилей водосливов, из коих пять являются профилями работающих водосливных плотин и один — рекомендуемый Кригером.

вод. ст. Профиль не застрахован и от вакуума перед гребнем водослива.

3. Профиль Аппалачиан (Appalachian) также подобен профилям АКД и Бовина и будет вакуумным на том же (но более узком) участке, что и профиль Кеокук.

Максимальный вакуум здесь будет иметь меньшую величину, именно порядка 0,2 м. Профиль не застрахован от вакуума перед гребнем водослива.

4. Профиль плотины Пар Шолс (Park Shols) имеет меньшее сечение, нежели профиль Кригера, и конфигурация этого профиля близка к кригеровской. С уверенностью можно сказать, что, как и профили С, К₁ и К₂, этот профиль будет иметь значительный вакуум перед гребнем водослива. Порядок вакуума — 1,0 м вод. ст. В сливной части вакуум возможен.



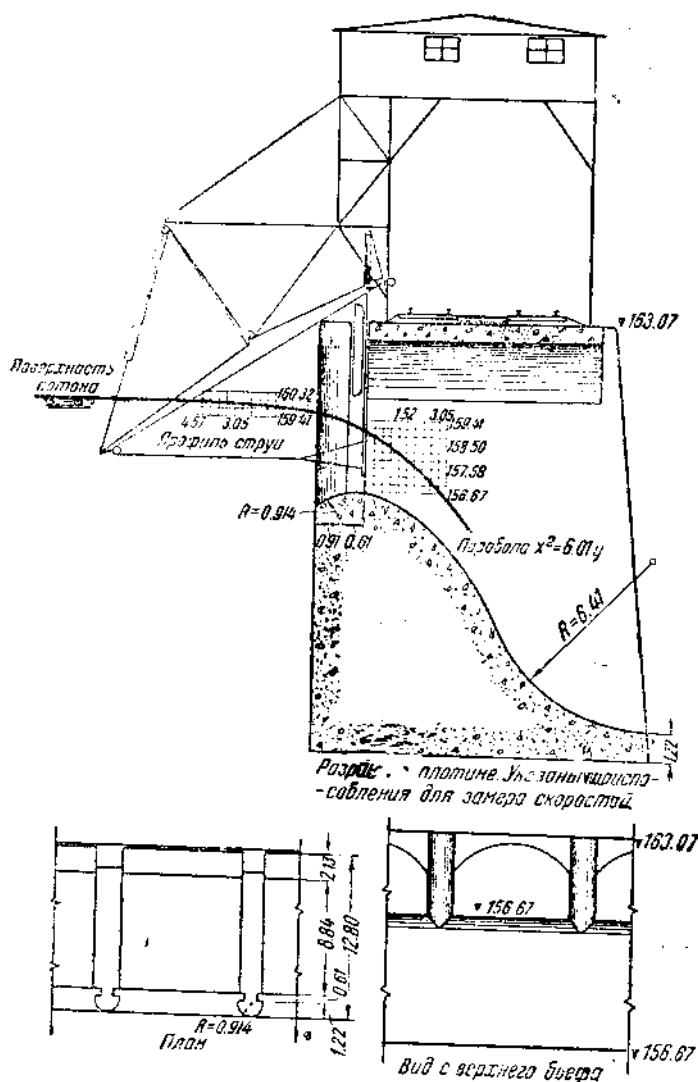
Фиг. 53.

5. Профиль Окой (Osoil) в смысле вакуума несколько в худшем положении, нежели испытанный нами профиль БК, и в лучшем — нежели профили АКД и Б. Здесь ожидается вакуум до 0,5 м на участке $\frac{x}{H} = 0,3$ до 0,7, при начале координат на гребне водослива. Перед гребнем вакуум возможен.

6. Профиль плотины Мак-Кол-Ферри (McCall Ferry) весьма полный и все же едва ли будет свободным от вакуума, при пониженных напорах, в конце сливной части.

Рассмотрим еще несколько профилей на фиг. 53. Эта группа приведена к напору $H = 1,0$ м; она имеет, как видно, еще большее разнообразие в конфигурации и площади отдельных профилей.

Здесь, как видно, колебания в площади весьма значительны и выражаются для интервала от $y=0$ до $y=1,0$ в $(138,5 - 71,5) = 67\%$; для интер-

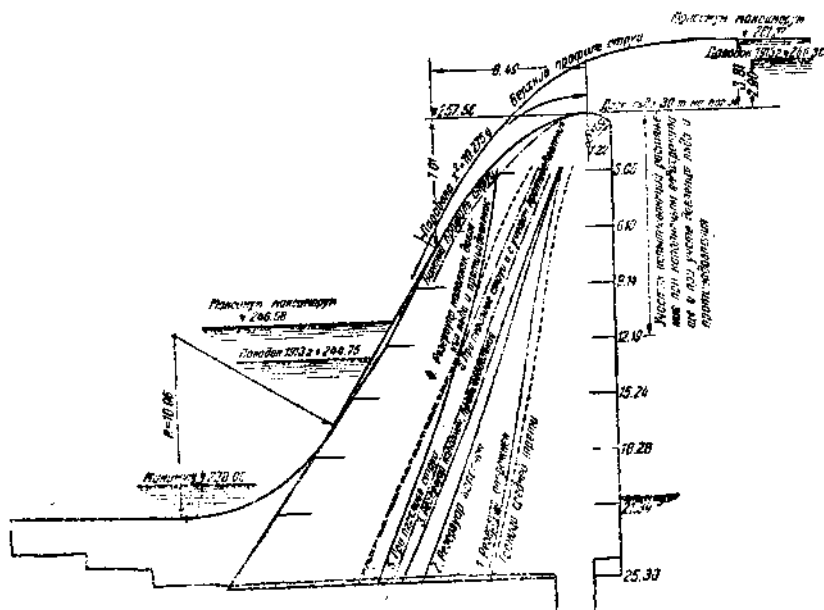


Фиг. 54.

вала от $y=0$ до $y=2,0$ в $(119,0 - 74,0) = 45\%$ и для интервала от $y=0$ до $y=3,0$ в $(117 - 78,5) = 38,5\%$.

С уверенностью можно сказать о профилях этой группы, что не все они

построены с учетом действия вакуума. Первый из этой группы, профиль плотины Мэйн, как и испытанный профиль АКД, будет вакуумным. Его радиусы кривизны на участке $0,5 < x < 1,4$ больше соответствующих для нижней струйки, а при $x > 1,5$ они меньше. Участок при $x > 1,5$ непременно будет вакуумным. По аналогии с профилями АКД, Б и БК вакуум здесь можно считать приблизительно в 0,3—0,5 м вод. ст. Перед гребнем этого



Фиг. 55.

профиля, судя по фиг. 53, должен быть вакуум порядка 0,5—0,75 м. Профиль этой плотины представлен на фиг. 54.

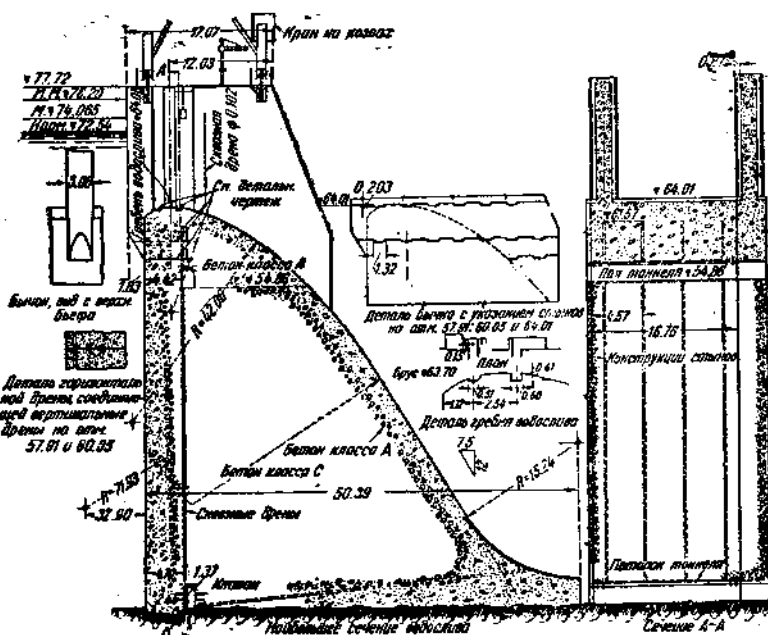
Профиль плотины Шонесса на участке при $x > 1,7$, т. е. там, где его радиусы кривизны, будучи меньше кригеровских, становятся затем равными радиусам последнего, будет вакуумным, и, на основании аналогии, его величина около 0,05—0,1 м вод. ст. Вакуум перед гребнем, на основании аналогий с профилями Б и К, должен иметь величину до 0,5 м вод. ст. Этот профиль представлен на фиг. 55.

Профиль плотины Седженей (Saguenaу), по всей вероятности, будет безвакуумным в сливной части, а также и в сопряжении напорной грани с гребнем водослива. В условиях плоской задачи был бы возможен вакуум перед гребнем водослива. Фиг. 56 представляет профиль рассматриваемой плотины.

На профиле плотины Американ фолс (American falls), чрезвычайно полном, вакуум все же возможен при пониженных напорах в конце сливной асти. Может быть, этот вакуум будет иметь место и при напорах, близких к расчетному, на участке $2,0 < x < 2,5$. Этот профиль приведен на фиг. 57.

Профиль плотины на р. Св. Лаврентия (St. Lawrence) (фиг. 58) будет иметь вакуум до гребня, по аналогии с испытанным профилем Крибштейн, порядка 1,0 м вод. ст. в условиях плоской задачи и порядка 0,75 м в условиях действительных. В сливной части профиля кривая давления волнообразна. Вакуум здесь меньшей величины.

Профиль плотины Каши Пул (Cushion Pool) построен по уравнению $x^2 = 52y$ или, для единичного напора, $x^2 = 2,08y$. Как и профили АКД и Б, он будет вакуумным. Но вакуум на сливе будет небольшим: примерно 0,05—0,15 м вод. ст. (фиг. 59).



Фиг. 56.

Профиль плотины Крибштейн (Kribstein) испытан в лаборатории и в условиях плоской задачи дал вакуум в 1,0 м вод. ст. В действительных условиях работы вакуум снизится и будет иметь величину порядка 0,6—0,75 м вод. ст. Год постройки этой плотины — 1929.

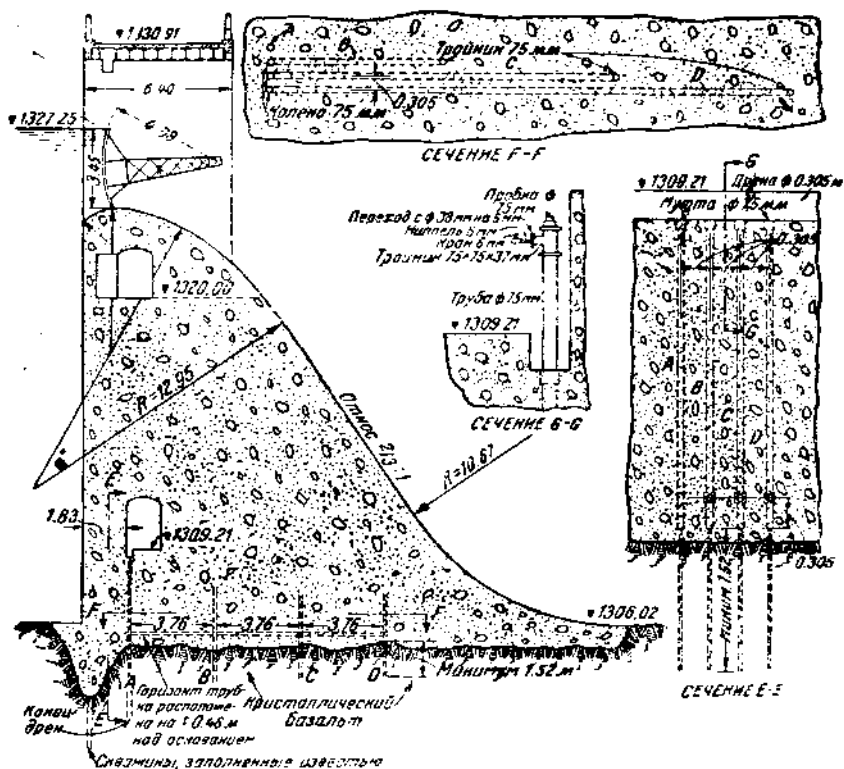
Профиль плотины Туломна (Toulomne) (фиг. 60) даже в интервале от $y = 0$ до $y = 1,0$, где он на 38,5% полнее профиля Кригера, будет вакуумным. Вакуум на участке при $x > 1,4$ здесь резче будет выражен, нежели на профиле Бовина. По всей вероятности, этот вакуум будет иметь величину до 1,0—1,25 м вод. ст. $H_{расч} = 3,05$ м; $W = 36,0$ м. Основание — скала.

Профиль Туломны в общем будет все же менее полон, нежели профиль Кригера. Из кривой $\frac{\omega_{тул}}{\omega_{криг}} = f\left(\sum_0^n y\right)$ нетрудно в этом убедиться. Для Туломны

$$\frac{W}{H} = 11,8.$$

Подчеркнем здесь еще раз, что оценка вакуумности, за отсутствием каких-либо других средств, производилась нами на основании аналогий, выявляющихся по приведении существующих и испытанных профилей водосливов к единичному напору, по известным характеристикам вакуумности профилей последней группы.

Поскольку моделирование вакуума представляет в настоящее время задачу,



Площади рассматриваемой группы приведены в табл. 41

Таблица 41

Название плотины	Площадь профиля в интервале от $y = 0$ до $y =$		
	1,0	2,0	3,0
1. Мейн (Main) $\frac{м^2}{\%}$	1,453 116,0	3,685 107,0	— —
2. Шонесси (O'Shaughnessy) $\frac{м^2}{\%}$	1,400 112,0	3,720 108,0	6,670 107,0
3. Седженей (Saguenay) $\frac{м^2}{\%}$	1,246 99,5	3,396 98,5	— —
4. Американ фолс (American falls) $\frac{м^2}{\%}$	1,561 125,0	4,104 119,0	7,339 117,0
5. Кригер; кладка $\frac{м^2}{\%}$	1,254 100,0	3,446 100,0	6,252 100,0
6. На реке Св. Лаврентия (Lawrence) $\frac{м^2}{\%}$	1,192 95,0	3,312 96,0	— —
7. Кашн (Cushion) $\frac{м^2}{\%}$	1,254 100	— —	— —
8. Крибштейн (Kribstein) $\frac{м^2}{\%}$	0,895 71,5	2,566 74,0	4,903 78,5
9. Туломна (Toulomne) $\frac{м^2}{\%}$	1,736 138,5	4,081 118,0	6,958 111,0

Приведем еще образцы профилей плотин.

На фиг. 61 — образец вакуумной плотины на слабом основании. Это — плотина Кристи (Christi); $W = 9,0$ м и напор $H = 6$ м. Вакуум — до 0,75 м.

На фиг. 62 — образец плотины с вакуумом порядка 1,5 — 2,0 м вод. ст. Плотина — на р. Драк. $H = 5,0$ м. Год постройки — 1902 г.

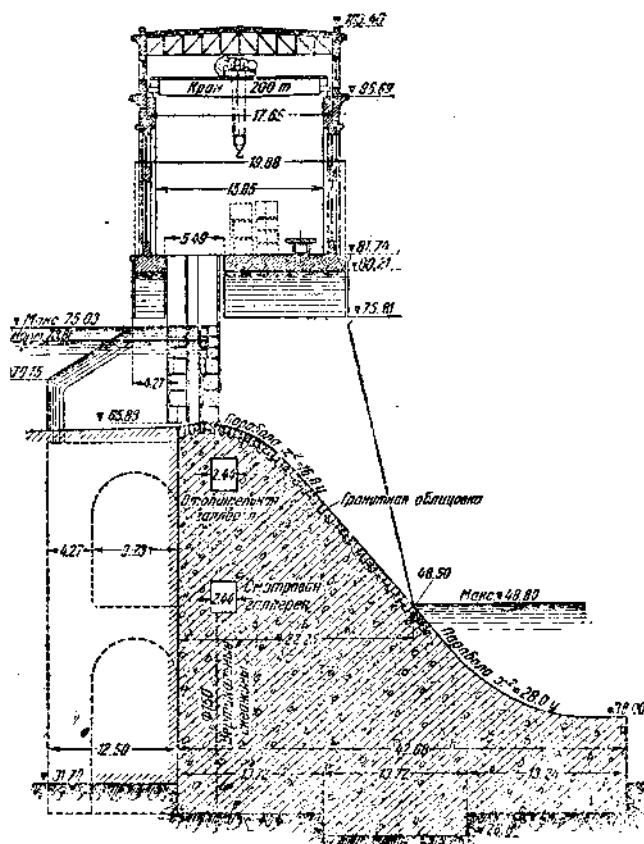
На фиг. 63 — плотина Ля Гранж для $H = 4,88$ м; $W = 39,0$ м. Вакуум — до 1,5 м вод. ст.

На фиг. 64 — Марикуинская плотина для $H = 3,66$ м, $W = 18,0$ м. Вакуум порядка 1,0 м вод. ст. Основание — скала.

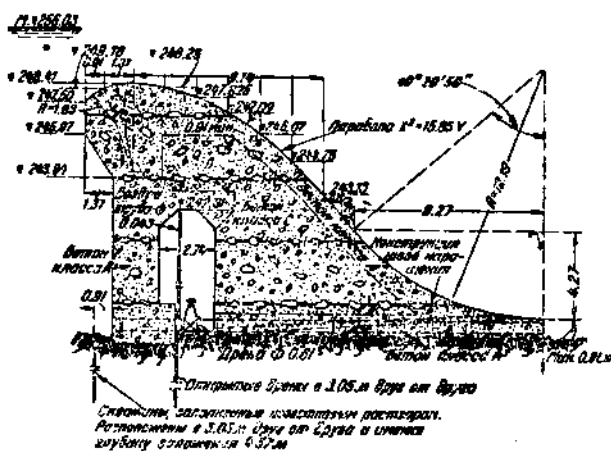
На фиг. 65 — профиль Волховской плотины. Вакуум порядка 0,25 м; $H = 2,13$, $W =$ до 17,5 м. Основание — известняк. Год постройки — 1927.

На фиг. 66 — профиль Земо-Авчальской плотины. Вакуум порядка 0,7 м вод. ст. при сопряжении напорной грани с гребнем водослива. $H = 7,0$ м; $W =$ до 23,0 м. Имеет гранитную облицовку. Построена на плотном песчанике в 1927 г.

В этом списке можно было также упомянуть о плотине Сызранской для

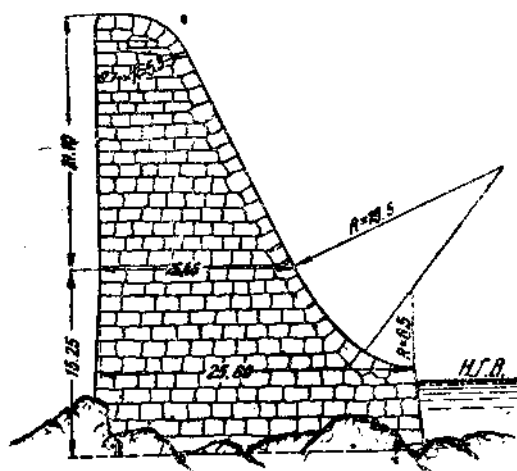


Фиг. 58.



Фиг. 59.

$H=3,0$ м; $W=9,0$ м на разрушенном доломите. Вакуум перед гребнем последней порядка 0,4 м вод. ст. Упомянуть здесь можно также о плотине Хельмер (Helmert Wehr) в Молдавии, о плотине Лянгман (Langmannsperre des Teigtischwerkes) для $H=1,75$ и $W=13,10$; о плотине Беккер: $H=6,7$ и $W=78,0$; о плотинах: Истон, Эрроурок, Гренит-Риф, Кальсвудской, Донмартин в Мексике и о сотне других.



Фиг. 60.

Все перечисленные плотины вакуумны. Они имеют самые разнообразные основания, одежду, напоры и высоты. Вакуум на некоторых из них, по всей вероятности, достигает 1,5—2,0 м вод. ст.

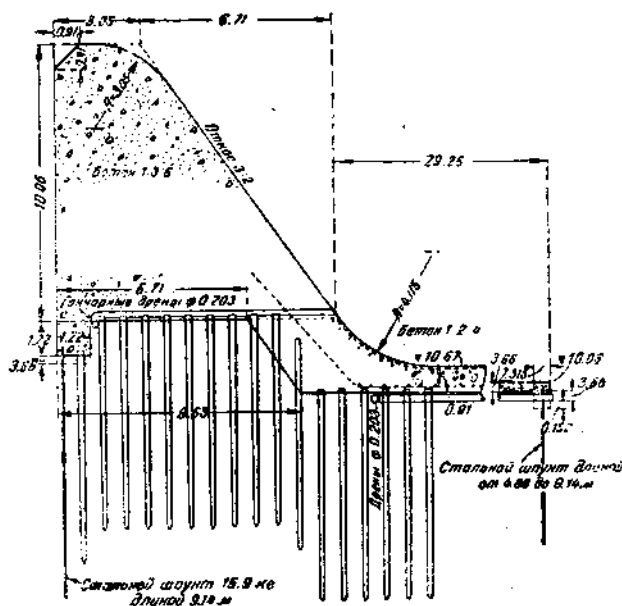
Вакуумность рассмотренного типа происходит от неправильной конфигурации водослива, и, в случае сечений водосли-

вов, больших кригеровского, эта вакуумность ничем не может быть оправдываема. Ее можно и следовало избежать.

48. Вакуум на водосливных плотинах, происходящий от несовершенства методов производства работ

Профиль водослива, в случае если он будет вполне согласован с нижним профилем струи на водосливе Базена, все же при современных методах постройки не будет свободным от „местного“ вакуума. Всякий профиль неровен и шероховат.

На Днепровской плотине, в частности, неровности могут быть охарактеризованы на некоторых участках как $\pm 0,1$ м по нормали от долженствующих координат

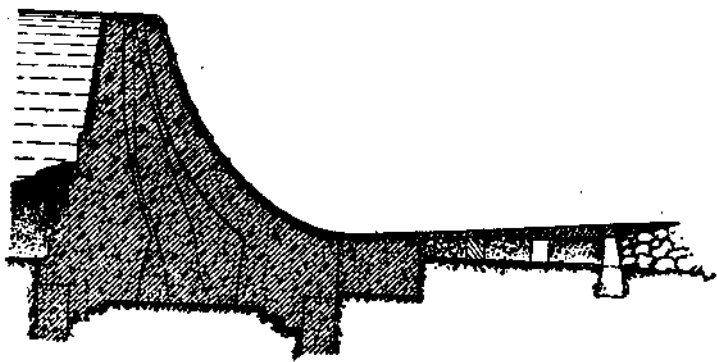


Фиг. 61.

которых участках как $\pm 0,1$ м по нормали от долженствующих координат

кладки. Профиль шероховат. По фиг. 67 и 68 можно судить о качестве поверхности.

Эти неровности и шероховатости естественны на всякой плотине и, согласно приведенным нами данным в обзоре экспериментов ГЭИ, вызовут местный вакуум, по всей вероятности, не меньшей величины, чем то полу-

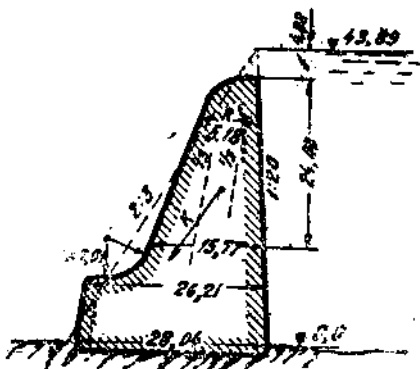


Фиг. 62.

чается при общем изломе потока. Этот местный вакуум, как показали эксперименты, тем значительнее, чем больше скорости, чем меньше (в известных границах) вспученность отдельных участков профиля.

В последнем пролете Днепровской плотины, непосредственно у гребня ее, за одним из обычных на теле выступов при напоре 3,0—3,5 м инж. Н. П. Зрелов установил вакуум в 0,5 м вод. ст. При возрастании напора до 6,5—8,95 м (рабочие напоры) вакуум с 0,5 м естественно возрастает до 1,0—1,5, а может быть, и до 2,0 м вод. ст. Это — единственный случай констатации местного вакуума на сооружении в натуре. Напоры 6,5—8,95 м на Днепровской плотине созданные с весны 1934 г., дают возможность продолжить исследования и получить полную картину изменений местного вакуума и его действия.

Материал для настоящего абзаца почерпнут из доклада производителя исследований Днепровской плотины Н. П. Зрелова на совещании при Институте местных стройматериалов.

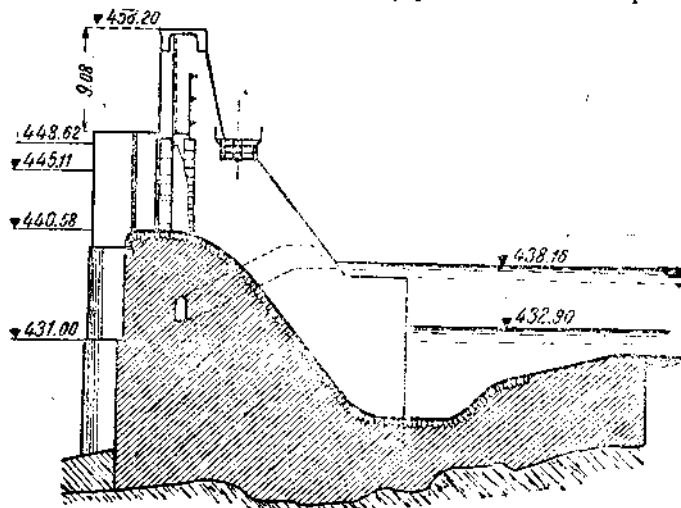


Фиг. 63.

49. Бычки, пазы и вакуум. Аэрация струи

Наличие пазов в бычках плотины, непосредственно у пазов, создает также участки местного вакуума. Максимальная величина этого вакуума, в зависимости от скорости потока, от размеров, положения и формы пазов

До сих пор вакуум у пазов никем не замерялся, и о его величине можно судить опять-таки на основе аналогий. Наличие же его у пазов неоспоримо, судя хотя бы по тем, покамест немногим, раковинам и кавернам, образу-



Фиг. 66.

ящимся за пазом на теле некоторых пролетов Днепровской плотины.

Поверхность переливающейся струи, благодаря пазам, сильно аэрирована.

При отсутствии воздействия сверху и с боков струя при значительных скоростях сохраняет сплошность. На фиг. 69 представлен перелив струи через Днепровскую плотину. Средняя поверхностная струйка, как видно, сохраняет неразрывность на всем пути, хотя скорости в конце слива здесь достигают порядка 25 м/сек.

Толщина переливающейся струи в любом сечении над профилем водослива периодически изменяется; периодически же изменяется давление струи; периодически изменяется и характер потока в нижнем бьефе за плотиной.

Эта периодичность неоспоримо вызывает вибрацию плотины, особенно отчетливо проявляющуюся на плотинах с упругим основанием.

Пульсация потока и вибрация затвора и плотины будут впервые изучаться на ДнепроГЭС.



Фиг. 67.

50. Заключение по части III

Все вышеизложенное позволит нам сделать следующие выводы:

1. Профиля современных водосливных плотин весьма разнообразны и даже при избыточной, для гидравлических условий, полноте в большей массе несвободны от „общего“ вакуума.



Фиг. 63.

2. Профиля всех существующих плотин по условиям технологическим не свободны от вакуума „местного“.
3. Величина местного и общего вакуума на современных плотинах достигает, по всей вероятности, до 1,0—1,5 м вод. ст.
4. Учитывая неизученность проявления вакуума, на основании первых трех пунктов заключения и данных экспериментов, профилем-максимумом, по гидравлическим условиям можно принять для плотин на слабых основаниях, плотин дорогах, ответственных профиль кладки по Кригеру (исправленный).
5. Для плотин на скальном основании из стройматериалов высокого качества могут быть применяемы вакуумные профили, при обязательном испытании

этих профилей в лабораториях. Как вакуумный профиль может быть использован профиль K_4 или K_5 или даже профиль Кригера, если расчетным напором считать для него напор, равный примерно 0,9 от максимального. Как на профилях K_4 и K_5 , а также и на кригеровском, построенном по условию $H_{расч} = 0,9 H_{макс}$, вакуум располагается в наименее опасной зоне до гребня водослива.



Фиг. 69.

При желании, одновременно с экономией в кладке, получить высокий коэффициент расхода наиболее целесообразно применение профилей типа Ребокка. Профиля Бовина, Людина, Моррисона и Броди, АКД, Казанской, Пузыревского и Дейша, согласно испытаниям некоторых из них, не дают больших коэффициентов, нежели профиль Кригера; они имеют вакуум в опасной зоне (большие скорости) и не могут быть рекомендованы для практики.

6. Изучению законов моделирования, изучению действия вакуума на водосливы должно быть уделено значительно большее, нежели до сего времени, внимание.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, Аналитическое выражение кривой профиля водосливной плотины. („Гидротехнический сборник“ № 3).
2. Бовия, Способ определения рациональной формы водослива при закруглении гребня. Из книги того же автора: „Использование водной энергии“.
3. Казанская, Водосливные плотины. „Известия Гос. гидрологического института“, № 20, 1927 г.
4. Дейша, Статья из „Известий Московской горной академии“ за 1922 г.
5. Блей, Ирригационные сооружения, вып. 1, 1923 г.
6. Анисимов, Водохранилищные плотины.
7. Анисимов, Водоподъемные плотины.
8. Будилов, Гидравлические профили Днепровской плотины, из „Бюллетеня Днепростроя“ за 1928 г., № 5.
9. Киршмер, Статья по докладу в „Вестнике науки и техники“ № 9, 1933 г.
10. Koch Carstanjen, Von der Bewegung des Wassers.
11. Weyrauch-Strobel, Hydraulisches Rechnen.
12. Ludin, Die Wasserkräfte.
13. Keutner Chr., Der Einfluss der Krümmung der Wasserfäden auf die Energiebilanz из „W. u. W.“ за 1933 г., № 3 и 4.
14. Kozeni, статья из „W. u. W.“ за 1931 г., № 19.
15. Mises R., Berechnung von Ausfluss und Ueberfallzahlen из „Z. d. VDI“ за 1917 г., № 21, 22 и 23.
16. Lauck A., Der Überfall über ein Wehr из „Z. für angewandte Mathematik und Mechanik“ за 1925 г., № 1.
17. Berdal A., Überfallformeln из „W. u. W.“ за 1931 г., № 20, 21, 22 и 23.
18. Schoklich, Wasserbau.
19. Bundschu, Überstromen, Überfall und Ausfluss из „Bauingenieur“ за 1928 г., № 26 и за 1930 г., № 22.
20. Scimemi, Sulla forma della vene tralimenti из „L'Energia" Elettrica за 1930 г., № 4.
21. Jager, Notes sur la calcul des deversoirs et seuils из Bulletin technique de la Suisse Romande, 1933 г., № 13 и 14.
22. Spronck R., La Similitude Hydrodynamique et les essais sur Modèles en Hydraulique Applique из „Annales des travaux publique de Belgique“ 1932 г., № 1 и 2.
23. Эсканд и Камшель, Исследование водосливных плотин на малых моделях.
24. Creager, Engineering for masonri Dams.
25. Parcer, The Control of Water.
26. Орам, Разрыв скалы сосредоточенным потоком, „Eng. New Record“, т. 93, № 5, 1927 г.
27. Пульс, Пропускная способность Вильсововской плотины.
28. Nagler and Davis A., Experiments on Spillway Discharge of the Keokuk Dam, „Proceedings of the Soc. Civ. Engineers“, 1929 г., февраль.
29. Бахмерев Б. А. проф., Гидравлика.
30. Bazin, Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir, 1898, „Annales des ponts et chaussées“, II, стр. 151.
31. Braschman, Bestimmung der Abflussmenge von Überfällen Ziveling, 1863, стр. 450.

32. Frese, Versuche über Abfluss des Wassers bei vollkommenen Überfällen, „Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure“, 1890, стр. 1285.
 33. Hanzen, Die Bestimmung von Wassermengen mittels Überfällen ohne Seitenkontraktion, *тот же журнал*, 1892 г., стр. 1057.
 34. Kinzer, Wasserlichungen und Überfallmessungen, „Zeitschrift des österreichischen Architekten und Ingenieurvereins“, 1897, стр. 544.
 35. Kramer, Der Abfluss des Wassers über Wehre mit lotrechten Wandungen und halbkreisförmiger Krone., Karlsruhe, 1914 г.
 36. Rehbock, Die Berechnung vollkommener Überfallwehre, „Zeitschrift des Architekten und Ingenieurvereins Hannover“, 1913, № 2.
 37. Rehbock, Wassermessung mit scharfkantigen Überfallwehren, „Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure“, 1920, 73, № 24 и др.
-

ТАБЛИЦЫ I—IV.

Таб.

Координаты нижнего профиля струи и кладки

Базен		Шимеми		Сабанеев		2ЛЦ		Кригер			Казан-ская		Бовин		Бовин	
х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	к	х	у	х	у	х	у
0,000	0,126	0,000	0,126	0,000	0,120	0,000	0,185	0,000	0,126	0,126	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,056	0,060	0,056	0,060	0,022	0,087	0,056	0,062	0,100	0,036	0,036	0,114	0,030	0,176	0,012	0,146	0,007
0,113	0,030	0,113	0,030	0,056	0,048	0,111	0,029	0,200	0,007	0,007	0,225	0,004	0,254	0,026	0,292	0,036
0,169	0,012	0,169	0,012	0,012	0,021	0,167	0,018	0,300	0,000	0,000	0,281	0,000	0,369	0,058	0,462	0,094
0,225	0,003	0,225	0,003	0,168	0,008	0,222	0,003	0,400	0,007	0,006	0,356	0,001	0,463	0,091	0,646	0,191
0,281	0,000	0,281	0,000	0,224	0,001	0,278	0,000	0,500	0,027	0,025	0,450	0,006	0,547	0,129	0,842	0,333
0,338	0,001	0,333	0,002	0,279	0,001	0,374	0,004	0,600	0,063	0,060	0,563	0,046	0,622	0,170	1,043	0,519
0,394	0,007	0,394	0,008	0,336	0,003	0,456	0,012	0,700	0,103	0,098	0,676	0,087	0,693	0,213	1,249	0,750
0,450	0,017	0,450	0,018	0,392	0,009	0,534	0,029	0,800	0,153	0,147	0,783	0,125	0,758	0,255	1,456	1,023
0,506	0,030	0,507	0,034	0,448	0,020	0,622	0,056	0,900	0,206	0,198	0,901	0,205	0,819	0,302	1,664	1,341
0,563	0,046	0,563	0,052	0,504	0,035	0,757	0,111	1,000	0,267	0,256	1,013	0,295	0,879	0,348	1,872	1,700
0,619	0,065	0,619	0,070	0,559	0,053	0,867	0,167	1,100	0,335	0,322	1,157	0,396	0,935	0,394	2,286	2,542
0,676	0,087	0,676	0,091	0,616	0,074	0,960	0,222	1,200	0,410	0,393	1,238	0,503	0,988	0,443	2,698	3,545
0,732	0,111	0,732	0,116	0,682	0,098	1,040	0,278	1,300	0,497	0,477	1,350	0,627	1,040	0,492	3,108	4,701
0,788	0,136	0,788	0,133	0,723	0,124	1,114	0,334	1,400	0,591	0,565	1,463	0,757	1,090	0,542	3,516	6,031
		0,844	0,169	0,783	0,153	1,180	0,390	1,500	0,693	0,662	1,567	0,897	1,137	0,592		
		0,901	0,205	0,894	0,219	1,246	0,451	1,600	0,801	0,764	1,688	1,037	1,187	0,642		
		0,957	0,236	1,006	0,292	1,308	0,501	1,700	0,918	0,873	1,800	1,198	1,230	0,692		
		1,013	0,277	1,118	0,374	1,355	0,557	1,800	1,041	0,987	1,913	1,364	1,273	0,7		
		1,070	0,321	1,230	0,464	1,422	0,613	1,900	1,172	1,108	2,026	1,540	1,317	0,796		
		1,126	0,366	1,342	0,562	1,477	0,668	2,000	1,310	1,235	2,232	1,943	1,397	0,900		
		1,237	0,458	1,454	0,668	1,534	0,723	2,100	1,456	1,369	2,364	2,153	1,476	1,004		
		1,350	0,560	1,566	0,782	1,583	0,779	2,200	1,609	1,508	2,477	2,322	1,550	1,108		
		1,463	0,659	1,677	0,902	1,644	0,835	2,300	1,769	1,654	2,588	2,603	1,623	1,216		
		1,576	0,794	1,790	1,032	1,689	0,891	2,400	1,936	1,804	2,702	2,867	1,690	1,322		
		1,688	0,924	1,900	1,170	1,740	0,946	2,500	2,111	1,960	2,814	3,130	1,737	2,430		
		1,802	1,061	2,013	1,316	1,791	1,003	2,600	2,293	2,122	2,920	3,404	1,320	1,537		
		1,914	1,205	2,125	1,470	1,833	1,058	2,709	2,482	2,299	3,040	3,652	1,835	1,645		
		2,027	1,367	2,236	1,632	1,873	1,113	2,800	2,679	2,463	3,162	3,970	2,062	1,970		
		2,140	1,531	2,327	1,767	1,921	1,169	2,900	2,883	2,640	3,265	4,270	2,380	2,517		
		2,250	1,702	4,395	4,951	1,965	1,225	3,000	3,094	2,824	3,377	4,575				
		2,477	2,030			2,005	1,281	3,100	3,313	3,013	3,490	4,888				
		2,702	2,518			2,047	1,337	3,200	3,539	3,207	3,604	5,240				
		2,927	2,986			2,090	1,392	3,300	3,772	3,405	3,718	5,480				
		3,152	3,462			2,129	1,449	3,400	4,013	3,609	3,831	5,925				
		3,377	4,017			2,163	1,502	3,500	4,261	3,818	3,540	6,320				
		3,603	4,575			2,210	1,558	3,600	4,516	4,031						
						2,247	1,614	3,700	4,779	4,243						
						2,286	1,670	3,800	5,049	4,471						
						2,323	1,725	3,900	5,325	4,699						
						2,358	1,731	4,000	5,610	4,930						
						2,365	1,792									
						3,003	2,755									

Пузыревский		Павлов		Людин		Людин		Моррисон и Брэдн		АКД		Мюллер		Дейша	
х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у
0,000	0,126	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,126	0,000	0,000
0,118	0,030	0,130	0,005	0,145	0,010	0,154	0,000	0,100	0,005	0,056	0,053	0,056	0,660	0,100	0,004
0,225	0,003	0,275	0,028	0,304	0,043	0,317	0,044	0,200	0,022	0,113	0,025	0,113	0,030	0,200	0,018
0,281	0,000	0,439	0,080	0,483	0,126	0,493	0,112	0,300	0,050	0,197	0,007	0,169	0,012	0,300	0,040
0,451	0,009	0,621	0,171	0,675	0,255	0,681	0,218	0,400	0,089	0,282	0,000	0,225	0,003	0,400	0,071
0,563	0,031	0,816	0,307	0,876	0,485	0,877	0,367	0,500	0,139	0,331	0,005	0,231	0,000	0,500	0,111
0,676	0,069	1,017	0,489	1,081	0,668	1,078	0,560	0,600	0,200	0,481	0,018	0,338	0,001	0,600	0,160
0,788	0,129	1,224	0,716	1,288	0,953	1,283	0,796	0,700	0,272	0,581	0,040	0,394	0,007	0,700	0,217
0,901	0,183	1,432	0,986	1,498	1,287	1,488	1,074	0,800	0,356	0,681	0,072	0,450	0,017	0,800	0,281
1,013	0,257	1,642	1,301	1,702	1,673	1,694	1,394	0,900	0,450	0,781	0,112	0,506	0,030	0,900	0,380
1,158	0,358	1,850	1,659	1,909	2,103	1,900	1,756	1,000	0,556	0,881	0,161	0,563	0,046	1,000	0,445
1,238	0,456	2,268	2,498	2,423	3,460	2,312	2,602	1,100	0,672	0,931	0,219	0,619	0,085	1,200	0,641
1,851	1,564	2,687	3,500	2,934	4,983	2,721	3,608	1,200	0,800	1,081	0,287	0,676	0,087	1,400	0,872
1,463	0,679	3,093	4,661			3,129	4,773	1,300	0,938	1,181	0,363	0,732	0,111	1,600	1,140
1,576	0,810	3,503	5,982					1,400	1,090	1,281	0,449	0,788	0,136	1,800	1,440
1,688	0,927							1,500	1,252	1,481	0,546	0,795	0,139	2,000	1,775
1,802	1,062							1,600	1,423	1,661	0,878	0,895	0,189	2,200	2,150
1,914	1,208							1,700	1,604	1,881	1,147	0,935	0,247	2,400	2,560
2,027	1,364							1,800	1,860	2,081	1,450	1,035	0,313	2,600	3,000
2,252	1,682							1,900	2,005	2,281	1,790	1,195	0,385	2,800	3,485
2,364	1,854							2,000	2,225	2,481	2,170	1,295	0,467	2,900	3,740
2,477	2,042							2,200	2,630	2,681	2,585	1,395	0,553	3,000	4,000
2,590	2,245							2,400	3,200	2,881	3,031	1,495	0,653	3,200	4,555
2,702	2,453							2,600	3,760	3,081	3,247	1,595	0,757		
2,813	2,674							2,800	4,360	3,281	4,040	1,695	0,869		
2,927	2,902							3,000	5,000			1,795	0,989		
3,040	3,035							3,200	5,680			1,895	1,115		
3,151	3,388											1,995	1,250		
3,266	3,625											2,095	1,392		
3,378	3,917											2,195	1,544		
3,492	4,181											2,295	1,702		
3,601	4,471											2,395	1,868		
3,717	4,767											2,495	2,042		
3,830	5,647											2,595	2,223		
												2,695	2,413		
												2,795	2,610		
												2,895	2,814		
												2,995	3,027		
												3,095	3,247		
												3,195	3,474		
												3,495	4,204		
												3,795	5,003		

При $\varepsilon = 0,1$

По уравнению $x^2 = 2,044y$

Из уравнения: $x^2 = 1,73y$

Из уравнения $x^2 = 2,044y$

По уравнению $x^2 = 1,8y$

Таблица II

x	По таблице Критера y	По уравнению $y^2 = 2,732 y$ y	Принятый нижний про- филь про- филь струн y	$\pm \Delta$	По таблице Критера Укладки y	$\pm D$	$x = x - 0,3$	x^2	$0,034 x^2 = D_1$	$\theta = D - D_1$	Вспр.	Принят у кладки y	x	Упр. Упр. кл.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,0	0,126	—	0,126	0,000	0,125	0,000	—	—	—	—	0,000	0,126	0,0	0,000
0,1	0,036	—	0,036	0,000	0,036	0,000	—	—	—	—	0,000	0,036	0,1	0,000
0,2	0,007	—	0,007	0,000	0,007	0,000	—	—	—	—	0,000	0,007	0,2	0,000
0,3	0,000	—	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,3	0,000
0,4	0,007	—	0,007	0,000	0,007	0,000	0,1	0,001	0,000	0,000	0,001	0,006	0,4	0,001
0,5	—	—	0,027	—	—	—	0,2	0,005	0,000	—	0,002	0,025	0,5	—
0,6	0,063	—	0,063	0,000	0,060	0,003	0,3	0,027	0,000	0,003	0,003	0,060	0,6	0,000
0,7	—	—	0,103	—	—	—	0,4	0,064	0,001	—	0,004	0,098	0,7	—
0,8	0,153	—	0,153	0,000	0,142	0,011	0,5	0,125	0,002	0,009	0,004	0,147	0,8	+0,005
0,9	—	0,018	0,206	—	—	—	0,6	0,216	0,003	—	0,005	0,198	0,9	—
1,0	0,267	0,259	0,267	0,000	0,257	0,010	0,7	0,343	0,005	0,005	0,006	0,256	1,0	-0,001
1,1	—	0,330	0,335	—	—	—	0,8	0,512	0,007	—	0,006	0,322	1,1	—
1,2	0,410	0,410	0,410	0,000	0,394	0,013	0,9	0,723	0,010	0,003	0,007	0,393	1,2	-0,004
1,3	—	0,497	0,497	—	—	—	1,0	1,000	0,013	—	0,007	0,477	1,3	—
1,4	0,590	0,591	0,591	0,001	0,565	0,025	1,1	1,331	0,018	0,008	0,008	0,565	1,4	0,000
1,5	—	0,693	0,693	—	—	—	1,2	1,728	0,023	—	0,008	0,662	1,5	—
1,6	—	0,801	0,801	—	—	—	1,3	2,197	0,029	—	0,008	0,764	1,6	—
1,7	0,920	0,918	0,918	-0,002	0,870	0,043	1,4	2,744	0,037	0,009	0,008	0,873	1,7	+0,003
1,8	—	1,041	1,041	—	—	—	1,5	3,375	0,045	—	0,009	0,987	1,8	—
1,9	—	1,172	1,172	—	—	—	1,6	4,096	0,055	—	0,009	1,108	1,9	—
2,0	1,310	1,310	1,310	0,000	1,229	0,090	1,7	4,913	0,066	-0,024	0,009	1,235	2,0	+0,015
2,1	—	1,456	1,456	—	—	—	1,8	5,832	0,078	—	0,009	1,369	2,1	—
2,2	—	1,603	1,603	—	—	—	1,9	6,859	0,092	—	0,009	1,508	2,2	—
2,3	—	1,769	1,769	—	—	—	2,0	8,000	0,107	—	0,008	1,654	2,3	—
2,4	—	1,936	1,936	—	—	—	2,1	9,261	0,124	—	0,008	1,804	2,4	—
2,5	2,100	2,111	2,111	0,011	1,960	0,151	2,2	10,648	0,143	0,008	0,008	1,960	2,5	0,000
2,6	—	2,293	2,293	—	—	—	2,3	12,167	0,163	—	0,008	2,122	2,6	—
2,7	—	2,482	2,482	—	—	—	2,4	13,824	0,185	—	0,008	2,289	2,7	—
2,8	—	2,679	2,679	—	—	—	2,5	15,625	0,209	—	0,007	2,463	2,8	—
2,9	—	2,883	2,883	—	—	—	2,6	17,546	0,236	—	0,007	2,640	2,9	—
3,0	3,110	3,094	3,094	0,016	2,820	0,274	2,7	19,683	0,264	0,010	0,006	2,824	3,0	-0,004
3,1	—	3,313	3,313	—	—	—	2,8	21,952	0,294	—	0,006	3,013	3,1	—
3,2	—	3,539	3,539	—	—	—	2,9	24,339	0,327	—	0,005	3,207	3,2	—
3,3	—	3,772	3,772	—	—	—	3,0	27,000	0,362	—	0,005	3,405	3,3	—
3,4	—	4,013	4,013	—	—	—	3,1	29,791	0,400	—	0,004	3,609	3,4	—
3,5	4,260	4,261	4,261	0,001	3,820	0,441	3,2	32,768	0,439	0,002	0,004	3,818	3,5	-0,002
3,6	—	4,516	4,516	—	—	—	3,3	35,973	0,482	—	0,003	4,031	3,6	—
3,7	—	4,779	4,779	—	—	—	3,4	39,304	0,527	—	0,003	4,249	3,7	—
3,8	—	5,049	5,049	—	—	—	3,5	42,875	0,576	—	0,002	4,471	3,8	—
3,9	—	5,326	5,326	—	—	—	3,6	46,656	0,626	—	0,001	4,699	3,9	—
4,0	5,610	5,610	5,610	0,000	4,930	0,680	3,7	50,653	0,679	0,001	0,001	4,930	4,0	0,000

Координаты профилей: Кригера, Бовинг, Сабанеева, американской консултации Днепростроя, 1 ЛЦ, 2 ЛЦ и БК для $H=8,98$ м (с учетом скоростного напора)

№ телят	Кригер		Бовин		БК		Сабанеев		АКД		1 ЛЦ		2 ЛЦ	
	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у	х	у
1	0,00	42,25	0,00	42,25	0,00	42,25	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,89	42,23	1,58	42,14	1,58	42,14	0,25	0,01	1,00	0,0495	1,58	0,11	0,86	0,04
3	1,79	42,04	2,28	42,02	2,28	42,02	0,75	0,03	2,00	0,1975	2,28	0,23	1,60	0,11
4	3,57	41,44	3,31	41,73	3,31	41,73	1,25	0,08	3,00	0,445	3,31	0,52	2,30	0,26
5	5,36	40,56	4,16	41,43	4,16	41,43	1,75	0,18	4,00	0,792	4,00	0,82	3,09	0,50
6	7,15	39,38	4,91	41,09	4,91	41,09	2,25	0,31	5,00	1,236	4,76	1,16	4,30	1,00
7	8,94	17,96	5,58	40,72	5,58	40,72	2,75	0,47	6,00	1,775	5,49	1,53	5,29	1,50
8	10,73	36,30	6,22	40,34	6,22	40,34	3,25	0,66	7,00	2,42	6,12	1,91	6,12	2,00
9	13,41	33,38	6,80	39,96	6,80	39,96	3,75	0,48	8,00	3,17	6,69	2,29	6,84	2,50
10	16,09	29,94	7,35	33,54	7,35	39,54	4,25	1,11	9,00	4,00	7,28	2,71	7,50	3,00
11	20,56	23,12	7,89	39,13	7,89	39,13	4,75	1,37	10,00	4,94	7,90	3,12	8,10	3,50
12	—	—	8,39	38,71	8,39	38,71	5,75	1,96	11,00	5,987	8,30	3,54	8,68	4,00
13	—	—	8,87	38,27	8,87	38,27	6,75	2,61	13,00	8,36	8,80	3,98	9,25	4,50
14	—	—	9,34	37,83	9,00	38,15	7,75	3,34	14,00	9,69	9,31	4,42	9,76	5,00
15	—	—	9,78	37,39	9,31	37,82	8,75	4,15	15,00	11,12	9,79	4,87	10,28	5,50
16	—	—	10,21	36,94	10,00	37,15	9,75	5,02	16,00	12,65	10,27	5,31	10,78	6,00
17	—	—	10,63	36,49	10,50	36,62	10,75	5,97	17,00	14,28	10,75	5,76	11,28	6,50
18	—	—	11,04	36,04	11,00	36,08	11,75	6,98	18,00	16,00	11,19	6,21	11,75	7,00
19	—	—	11,43	35,75	11,50	35,54	12,75	8,07	19,00	17,82	11,65	6,63	12,21	7,50
20	—	—	11,82	35,11	12,00	34,98	13,75	9,23	20,00	19,76	12,09	7,14	12,66	8,00
21	—	—	12,54	34,17	12,50	34,42	14,75	10,46	—	—	12,96	8,08	13,12	8,50
22	—	—	13,25	33,24	13,00	33,84	15,75	11,76	—	—	13,76	9,01	13,58	9,00
23	—	—	13,92	32,24	13,41	33,36	16,75	13,13	—	—	14,57	9,96	13,97	9,50
24	—	—	14,57	31,33	14,00	32,65	17,75	14,58	—	—	15,38	10,92	14,37	10,00
25	—	—	15,18	30,38	15,00	31,40	18,56	15,80	—	—	16,12	11,87	14,76	10,50
26	—	—	15,78	29,41	16,09	29,94	19,05	16,25	—	—	16,81	12,94	15,15	11,00
27	—	—	16,36	28,43	20,56	23,12	—	—	—	—	17,52	13,80	15,51	11,50
28	—	—	16,92	27,48	—	—	—	—	—	—	18,15	14,70	15,89	12,00
29	—	—	18,51	24,55	—	—	—	—	—	—	—	—	16,26	12,50
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16,62	13,00
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16,98	13,50
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,34	14,00
33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,68	14,50
34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,02	15,00
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,685	16,00
36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,73	16,10
37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24,43	24,75

№ пьезометра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние до первого пьезометра в мм по оси хх	0	14	33	52	91	127	171	206	246	279
Нулевые показания пьезометра	523	597	603	605,5	602	590,5	569	543	507,5	474
Давление струи при $H=179$ и открытом щите	+252,0	+ 19,0	+ 33,0	+ 24,5	+12,0	+ 2,5	+8,0	+7,0	+14,5	+25,0
То же $H=179$ мм; $l=100$ мм	+259,0	+ 89,0	+ 77,0	+ 52,5	+12,0	+ 4,5	-3,0	-3,0	+ 6,5	+17,0
„ „ $H=179$ „ $l= 50$ „	+259,0	+139,0	+112,0	+ 64,5	- 5,0	-12,5	0	-2,0	+ 3,5	+11,0
„ „ $H=179$ „ $l= 10$ „	+261,0	+184,0	+163,0	+ 24,5	- 7,0	- 6,5	+6,0	+1,0	+ 2,5	+ 6,0
„ „ $H=179$ „ $l= 5$ „	+261,0	+183,0	+159,0	-174,5	-13,0	+11,5	+7,0	+2,5	+ 5,5	+11,0
„ „ $H=154$ „ $l= 20$ „	+240,0	+144,0	+128,0	+ 47,5	- 9,0	+ 1,5	+5,0	0,0	+ 0,5	+ 7,0
„ „ $H=154$ „ $l= 5,0$	+237,0	+161,0	+139,0	-146,5	- 9,0	+12,5	+8,0	+3,0	+ 5,5	+11,0
„ „ $H=130$ „ $l= 20$ „	+213,0	+123,0	+106,0	+ 39,5	- 4,0	+ 5,5	+5,0	+2,0	+ 2,5	+ 7,0
„ „ $H=130$ „ $l= 5$ „	+213,0	+138,0	+118,5	-123,5	- 6,0	+12,5	+7,0	+3,5	+ 7,5	+12,0
„ „ $H=114$ „ $l= 2,5$	—	—	+109,0	- 97,5	- 2,0					
„ „ $H=125$ „ $l= 2,5$	—	—	+120,0	-110,5	- 3,0					
„ „ $H=143$ „ $l= 2,5$	—	—	+140,0	-120,5	- 5,0					
„ „ $H=182$ „ $l= 2,5$	—	—	+172,0	-154,5	- 9,0					
„ „ $H=105,7$ „ $l= 5,0$	—	—	+ 95,0	-100,5	- 3,5					
„ „ $H=126,0$ „ $l= 5,0$	—	—	+115,0	-121,0	- 6,5					
„ „ $H=130,0$ „ $l= 5,0$	—	—	+130,0	-131,5	- 8,0					
„ „ $H=169,0$ „ $l= 5,0$	—	—	+150,0	-155,5	-11,0					
„ „ $H=186,1$ „ $l= 5,0$	—	—	+165,0	-175,5	-13,0					
„ „ $H=123,3$ „ $l= 7,5$	—	—	+115,0	+ 16,5	- 2,0					
„ „ $H=153,7$ „ $l= 7,5$	—	—	+144,0	+ 16,5	- 4,0					
„ „ $H=175,3$ „ $l= 7,5$	—	—	+163,0	+ 17,5	- 6,0					
„ „ $H=143,8$ „ $l= 10$	—	—	+132,0	+ 22,5	- 4,0					
„ „ $H=172,2$ „ $l= 10$	—	—	+155,0	+ 24,5	- 6,5					
„ „ $H=178,7$ „ $l= 10$	—	—	+160,0	+ 25,0	- 7,5					
„ „ $H=193,1$ „ $l= 2,5$	—	—	+187,0	- 4,5	- 3,5					
„ „ $H=181,5$ „ $l= 5,0$	—	—	+175,0	- 2,0	- 4,0					
„ „ $H=181,5$ „ $l= 7,5$	—	—	+181,0	+ 9,0	- 6,0					

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	367	405	432	452	486	518	552	588	622	651	808	858	908
24	374	321	281	250	198,5	149	98,5	54	27	10	151	151	151
+11,0	+3,0	+12,0	+32,0	+29,0	+34,5	+49,0	+136,5	+244,0	+260,0	+247,0	+37,0	+11,0	+3,0
+4,0	-1,0	+2,0	+25,0	+20,0	+22,5	+28,0	+90,5	+187,0	+201,0	+182,0	+17,0	+2,0	-2,0
+2,0	-1,0	+0,5	+19,0	+9,0	+15,5	+18,0	+57,0	+123,0	+156,0	+125,0	-1,0	-5,0	-9,0
0,0	+1,0	+13,0	+11,0	+6,0	+1,5	+9,0	+9,5	+18,0	+47,0	+32,0	-4,0	-2,0	-3,0
+3,5	+2,0	+9,0	и т.д.	+8,0	+6,5	+14,0	+21,5	+51,0	+79,0	+60,0	-1,0	-3,0	-7,0
+1,0	-1,0	+5,0	+16,0	+6,0	+5,5	+10,0	+16,5	+3,5	+60,0	+39,0	-3,0	+2,0	-1,0
+3,0	+2,0	+8,0	+13,0	+5,0	+4,5	+10,0	+15,5	+37,0	+66,0	+47,0	-6,0	-3,0	-7,0
+1,0	+1,0	+5,0	+13,0	+6,0	+5,5	+9,0	+14,5	+26,0	+50,0	+38,0	-6,0	+2,0	-3,0
+4,0	+2,0	+8,0	+13,0										

Примечание: *l* — высота щели в мм.

Все приведенные выше эксперименты происходили при нижней грани щита шириной 50 мм

Опыты при ширине секущей кромки 5 мм.

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГИДРОМАШИНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ (ВИГМ) (б. ГЭИ)**

Москва, ул. Радио, 17

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ ТРУДЫ ИНСТИТУТА В 1934 г.

Том I. Содержание

Егоров С. А. — Гидроэнергетический научно-исследовательский институт.

Бовин В. Т. — Анализ результатов испытания моделей днепровских турбин.

Яковлев К. П. — Пьезоэлектрический метод исследования мгновенных сил и его применение в гидродинамике.

Будилов В. И. — Испытание гидравлического транспортера для каменного угля.

Кандидов А. П. — Фотографические методы гидравлических исследований.

Иванов А. Е. — Об измерении расхода в напорном трубопроводе методом Гибсона.

Шиллеров Б. А. — Трубка Пито. Цена 4 руб. 50 к. (Заказы направлять в институт.)

Том II. Содержание

Проф. Гончаров — О взвешивании наносов. Цена 4 руб. (Продается в книжных магазинах.)

Нотенев И. В. и Иванов В. И. — Турбина Банки — ГЭИ для сельских водяных установок. Цена 30 коп. (Продается в книжных магазинах.)

ВЫХОДЯТ ИЗ ПЕЧАТИ

Том III. Содержание

Инж. Офицеров А. С. — Гидравлический профиль водосливной плотины. (Продается в книжных магазинах.)

0814190

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГИДРОМАШИНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ (ВИГМ) (б. ГЭИ)**

Москва, ул. Радио, 17

ВЫХОДЯТ ИЗ ПЕЧАТИ

Том IV. Содержание

Проф. Гончаров В. Н. — Напорные оголовки сбросов.

Проф. Великанов М. А. — К вопросу о природе турбулентности.

Инж. Квятковский В. С. — Опыт нормализации серии гидротурбин с избытком давления.

Доц. Егоров С. А. — Давление потока на затворы скользящего трения.

Проф. Шапов Н. М. — Формы всасывающих труб и их проектирование.

Инж. Леонов И. Ф. — К вопросу применения водоструйных насосов в теплофикационной сети. (*Заказы направлять в институт.*)

Том V. Содержание

Инж. Вальтер П. А. — О движении вязкой жидкости в искривленном патрубке. (*Заказы направлять в институт.*)

Том VI. Содержание

Инж. Уральский Б. К. — Технический анализ электрической и гидромеханической части автоматической и гидростанции в Эривани. (*Заказы направлять в институт.*)

Том VII. Содержание

Инж. Егоров С. А. — Искаженное масштабирование моделей разливаемых русел.

Инж. Низель — Пьезометрический метод и прибор для измерения действия мгновенных сил в гидродинамике и гидротехнике.

Инж. Чугунов С. С. — Изучение переменных величин и новый конденсаторный метод.

Инж. Кандидов А. П. — Фотографические методы гидравлических исследований.

Проф. Пашевский — Влияние шероховатости на работу русловых моделей. (*Заказы направлять в институт.*)

Том VIII. Содержание

Инж. Чугунов С. С. — Точное измерение сопротивлений раствора соли слабой концентрации при определении расхода воды методом концентрации.

Инж. Пономарев С. Д. — К вопросу об экспериментальном изучении подъемных сил, развивающихся на лопатках винтовых турбин.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
23	4 снизу	$td_x v_x + v_x \frac{dx}{C_p^2 d}$	$tg \alpha \cdot dv_x + v_x \cdot dtg \alpha$
37	таблица 2 колонка	в интервале от $x=0$ до $x=0,75$	в интервале от $x=0$ до $x=0,25$
78	3 снизу	грацию	градацию
88	6,9 сверху	$\left(1 + \frac{1}{1,125 H + 1,6}\right)$	$\left(1 + \frac{1}{1,125 \cdot H + 1,6}\right)$
88	8 снизу	$\left(0,605 + \frac{1}{1,125 H - 3} + \dots\right)$	$\left(0,605 + \frac{1}{1,125 H - 3} + \dots\right)$
88	6 .	$\frac{0,797}{1,125 H - 3}$	$\frac{0,797}{1,125 H - 3}$
89	9 .	$\left(0,490 + \frac{0,00148}{H}\right)$	$\left(0,490 + \frac{0,00148}{H}\right)$
107	13 .	$W = 103, \text{ м};$	$W = 10,3 \text{ м};$

Цена 2 р. 25 к.

ЭГ-15-5-3

- 303060 -

RLST



0000000028355

1935