ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Ֆիզ.-մար., բն. և տեխն. գիտություն. VII, № 6, 1954 Физ.-мат., естеств. и техн. науки

ГИДРАВЛИКА

Г. А. Амбарцумян

Определение гидродинамического давления на плоский щит при истечении из-под щита

Правильное определение величины гидродинамического усилия на плоский щит при истечении из-под него имеет большое практическое и теоретическое значение.

В технической литературе часто допускают, что давление на плоский щит при истечении из-под него подчиняется гидростатическому закону [1].

Как показано нами [2], допущение гидростатического закона распределения давления на плоский щит при истечении из-под него приводит к неправильным результатам.

Кулька [3] и другие проводили теоретические и лабораторные исследования с целью выявления действительных усилий на щит.

Теоретические формулы Кульки, Коха-Корстаньена и других для вычисления горизонтального давления на плоский щит при истечении из-под щита, как показали лабораторные исследования Н. К. Гиринского [4], дают сильно расходящиеся значения давления на щит.

Н. К. Гиринский указывает [5], что значения гидродинамического давления, получаемые по теоретической формуле Кульки при $h_щ = 0{,}55\ H_0$, дает расхождение более 90%.

Н. Е. Жуковский, рассмотрев истечение из-под щита и усилие, приходящееся на щит, как давление потока на поперечную пластинку, заключенную между двумя параллельными стенками, установленными симметрично относительно потока, получает очень громоздкую формулу для определения давления в любой точке щита (математическая обработка принадлежит Н. К. Гиринскому).

Сравнение данных, полученных по теоретической формуле Н. Е. Жуковского, с экспериментальными дают хорошее совпадение, но, ввиду чрезмерной громоздкости, для практических целей эта формула не используется.

Н. К. Гиринский на основании обработки данных 62 специальных опытов получил [4] экспериментальную зависимость для вычисления давления на плоский щит. Однако эта формула не получила большого распространения.

По вопросу определения давления воды на плоский щит при наличии истечения из-под него в книге „Гидротехнические сооружения", том I [6] сказано: „... невозможность дать обобщенные формулы

гидродинамического давления, пригодные для различных условий работы затворов, следует притти к выводу, что расчет затвора без большой погрешности может вестись на горизонтальное давление воды (верхнего и нижнего бьефов), определенное по закону гидростатики...“

Н. К. Гиринский указывает [5], что по лабораторным данным при незатопленном истечении жидкости из-под щита отношение полного гидродинамического давления на затвор к полному гидростатическому получается:

Таблица 1

$h_ш : H$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$P_д : P_c$	0,955	0,922	0,884	0,867	0,87	0,87

При определении эжекционного эффекта при двухъярусном водоприеме, с целью его использования для улучшения промывки кармана, А. К. Ананян [1] составил уравнение количества движения для двух сечений: одно до раздельной горизонтальной полки, которая разделяет поток на две горизонтальные зоны, а другое после слияния этих потоков за полкой.

При использовании уравнения закона количества движения А. К. Ананян допустил, что гидродинамическое давление на щит при истечении из-под щита подчиняется гидростатическому закону

$$P_ш = \frac{\gamma H^2}{2}. \qquad (1)$$

Рассмотрев ту же задачу и при этом использовав уравнение Бернулли, мы пришли к отличным результатам.

Анализ причин, которые могли дать это расхождение, показал, что при использовании уравнения количества движения неправильно принят гидростатический закон распределения давления на щит при истечении из-под него.

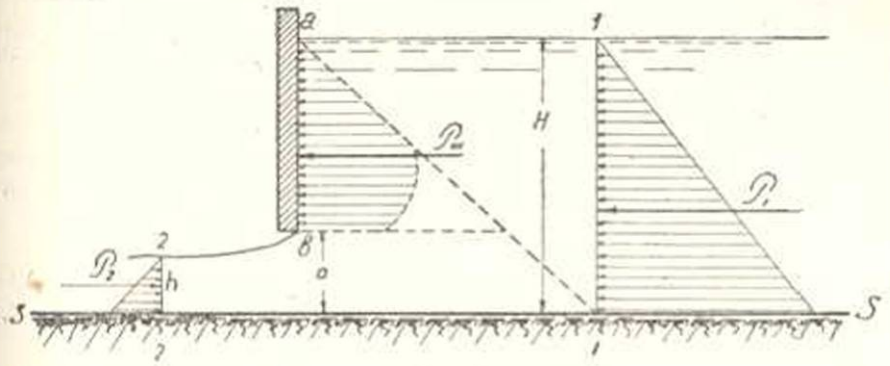
Для установления теоретической величины усилия, действующего на щит при истечении из-под него, рассмотрим случай свободного истечения жидкости из-под щита и применим к рассматриваемому случаю оба закона, т. е. закон количества движения и закон живых сил.

Предположим, что в призматическом русле установлен плоский щит (фиг. 1).

Для пропуска расхода из-под щита при данном открытии щита вода в водоводе должна подпираться до горизонта.

Берем два сечения по длине водовода: 1—1 и 2—2, причем сечение 1—1 берем на таком расстоянии от щита, чтобы возможно было допустить гидростатический закон распределения давления в потоке. Сечение 2—2 берем на некотором отдалении от щита, исходя из тех же соображений.

Применим к объему 1—1—a—b—2—2—1 закон количества движения. За ось проекций примем линию дна водовода S—S и положительное направление этой оси, совпадающей с направлением течения.



Фиг. 1.

При составлении уравнения количества движения делаем следующие допущения:

1. Водоток имеет достаточно малый уклон дна, поэтому можно пренебречь проекцией импульса силы тяжести.

2. Рассматриваемый участок имеет небольшую протяженность, поэтому проекцией импульса силы трения на стенках и на дне можно пренебречь.

3. Допускаем, что коэффициенты α_1 и α_2, учитывающие влияние неравномерности распределения скорости по сечениям 1—1 и 2—2 одинаковы, т. е.

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0 = \alpha. \tag{2}$$

Изменение проекции количества движения объема 1—1—a—b—2—2—1 за промежуток времени Δt будет

$$\alpha_0 \frac{\gamma}{g} \left(\omega_2 v_2^2 - \omega_1 v_1^2\right) \Delta t. \tag{3}$$

Величина суммы проекции импульсов всех сил, действующих на рассматриваемый объем, при учете выше сделанных допущений, будет сумма проекций импульсов гидродинамических усилий в сечениях 1—1, a—b и 2—2

$$\left(\frac{\gamma H^2}{2} - P_ш - \frac{\gamma h^2}{2}\right)\Delta t. \tag{4}$$

Знак минус для импульсов сил в сечениях 2—2 и a—b взят потому, что импульсы сил в этих сечениях и ось проекции направлены в противоположные стороны.

Приравнивая выражения (3) и (4) и сокращая на $\gamma . \Delta t$, получим:

$$\frac{\alpha_0}{g}\left(\omega_2 v_2^2 - \omega_1 v_1^2\right) = \frac{H^2}{2} - \frac{P_ш}{\gamma} - \frac{h^2}{2}. \tag{5}$$

Для одиночной ширины потока имеем:

$$\omega_2 = h \cdot 1 \text{ и } \omega_1 = H \cdot 1.$$

Подставляя эти значения в уравнение (5), получим:

$$\frac{\alpha_0}{g}\left(hv_2^2 - Hv_1^2\right) = \frac{H^2}{2} - \frac{P_ш}{\gamma} - \frac{h^2}{2}. \quad (6)$$

Для определения величины гидродинамического давления на щит при истечении из-под него определим значение скорости истечения из-под щита v_2 из уравнения Бернулли и подставим в уравнение (6). Скорость истечения будет:

$$v_2 = \varphi \sqrt{2g\left(H - h + \frac{\alpha v_1^2}{2g}\right)}. \quad (7)$$

Подставляя значение v_2 из (7) в (6), получим:

$$\frac{\alpha_0}{g}\left[\varphi^2 h 2g\left(H - h + \frac{\alpha v_1^2}{2g}\right) - H_1 v_1^2\right] = \frac{H^2}{2} - \frac{P_ш}{\gamma} - \frac{h^2}{2}, \quad (8)$$

откуда

$$P_ш = \gamma\left[H\left(\frac{H}{2} - 2\varphi^2\alpha_0 h\right) - h^2\left(\frac{1}{2} - 2\alpha_0\varphi^2\right) + \frac{\alpha v_1^2}{g}\left(H - \alpha_0\varphi^2 h\right)\right]. \quad (9)$$

Принимая $\alpha = \alpha_0 = 1$, из уравнения (9) получим:

$$P_ш = \gamma\left[H\left(\frac{H}{2} - 2\varphi^2 h\right) - h^2\left(\frac{1}{2} - 2\varphi^2\right) + \frac{v_1^2}{g}\left(H - \varphi^2 h\right)\right]. \quad (10)$$

Заменив h через $a\varepsilon$, получим:

$$P_ш = \gamma\left[H\left(\frac{H}{2} - 2\varphi^2\varepsilon^2 a\right) - a^2\varepsilon^2\left(\frac{1}{2} - 2\varphi^2\right) + \frac{v_1^2}{g}\left(H - \varphi^2 a\varepsilon\right)\right]. \quad (10')$$

Значение коэффициента скорости φ, как указывается в [7], при свободном истечении из-под щита равняется 0,97—1,00.

Принимая $\varphi = 1{,}0$, уравнение (10) перепишется так:

$$P_ш = \frac{\gamma}{2}(H - h)\left(H - 3h + \frac{2v_1^2}{g}\right) \quad (11)$$

или:

$$P_ш = \frac{\gamma}{2}(H - \varepsilon a)\left(H - 3\varepsilon a + \frac{2v_1^2}{g}\right). \quad (11')$$

Для построения кривой $P_ш$ в зависимости от открытия щита по формуле (11) заранее установим связь между величиной подходной скорости и открытием щита при постоянстве расхода воды в водоводе.

Единичный расход щитового отверстия при открытии щита на „a" будет:

$$q = \varphi\varepsilon a \sqrt{2g\left(H - \varepsilon a + \frac{v_1^2}{2g}\right)}, \quad (12)$$

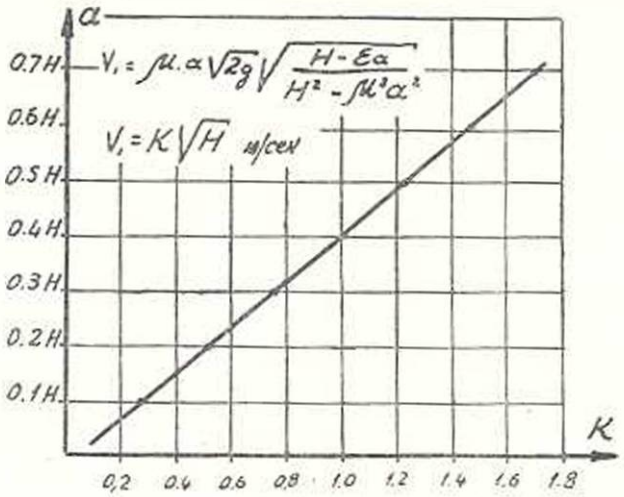
с другой стороны единичный расход равен:

$$q = 1 \cdot H \cdot v. \quad (13)$$

Приравнивая (12) и (13), получим:

$$v_1 = \varphi\varepsilon a \sqrt{2g \frac{H-\varepsilon a}{H^2-\varepsilon^2\varphi^2 a^2}}. \qquad (14)$$

Кривая изменения v_1 в зависимости от открытия щита [при постоянном значении H] будет иметь представленный на фиг. 2 вид.



Фиг. 2.

Подставляя значение v_1 из (14) в (11') и учитывая, что $\varphi = 1$, получим:

$$P_{ш} = \frac{\gamma H^2}{2}(1-k)\left(1-3k+4\frac{k^2}{1+k}\right), \qquad (15)$$

где

$$k = \varepsilon\frac{a}{H}.$$

Результаты подсчета показаны на фиг. 3.

Сравнение наших экспериментальных данных с данными Гиринского даны на фиг. 4.

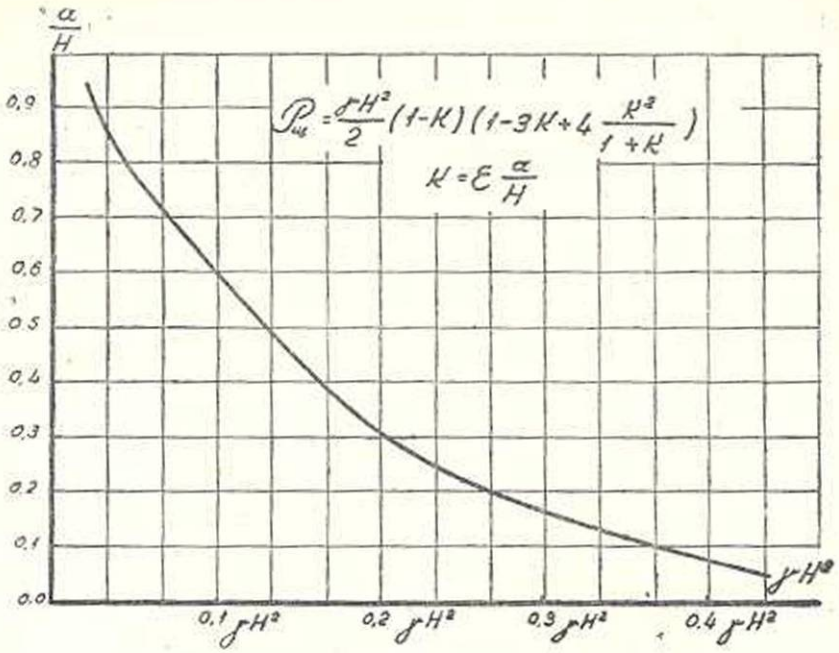
Зависимость (15) можно переписать в следующем виде:

$$P_{ш} = A\frac{\gamma H^2}{2}, \qquad (16)$$

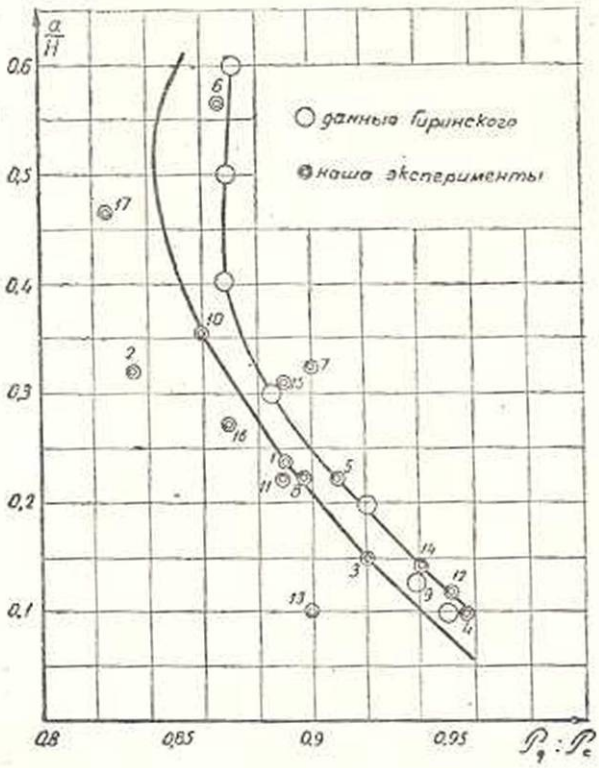
где A — коэффициент давления при истечении и определяется зависимостью:

$$A = (1-k)\left(1-3k+4\frac{k^2}{1+k}\right), \qquad (17)$$

где величина k является функцией коэффициента сужения ε и относительного открытия щита. Как получено Н. Е. Жуковским [7], величина ε в свою очередь есть функция относительного открытия $\frac{a}{H}$. Сле-

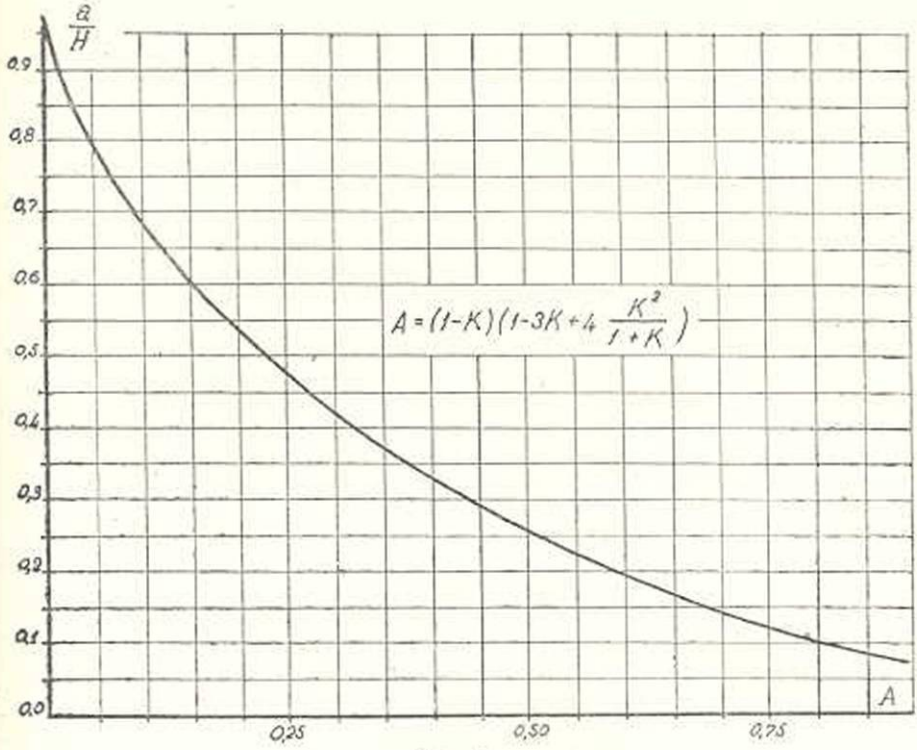

a/H
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
$P_н = \frac{\gamma H^2}{2}(1-K)(1-3K+4\frac{K^2}{1+K})$
$K = \varepsilon \frac{a}{H}$
0,1 γH²
0,2 γH²
0,3 γH²
0,4 γH²
γH²

Фиг. 3.


a/H
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
данные Гиринского
наши эксперименты
0,8
0,85
0,9
0,95
$P_э : P_с$

Фиг. 4.

довательно, $A = f\left(\frac{a}{H}\right)$. На фиг. 5 приводится кривая $A = f\left(\frac{a}{H}\right)$ по данным Н. Е. Жуковского.



Фиг. 5.

Величина усилия, действующего на щит, из уравнения (11) может равняться нулю при данном H, для двух значений h, а именно:

$$1.\ P_ш = 0 \text{ при } h = H, \tag{18}$$

что соответствует полному открытию щита и

$$2.\ P_ш = 0 \quad \text{при } h = \frac{H + \frac{2v_1^2}{g}}{3}. \tag{19}$$

Для проверки полученных формул (10) и (11) в гидротехнической лаборатории АрмНИИГиМ были поставлены специальные эксперименты.

В зеркальном лотке шириною $B = 400$ *мм* был установлен щит, снабженный подъемным винтом, с помощью которого ему придается необходимое открытие.

Для измерения проекции усилия гидродинамического давления, действующего по направлению SS, на напорной грани щита установлены пьезометрические трубки, соединенные с манометром.

Эксперименты проводились при разных расходах и открытиях плоского щита.

Данные 18 экспериментов приведены в таблице 2.

Подходные скорости измерялись трубкой Пито-Ребока. При расчетах брались средние скорости сечения по зависимости

$$v_1 = \frac{Q}{bH}.$$

Таблица 2

Q л/с	a см	H см	h см	ε	v_1 см/сек	Пьезометры 1	2	3	4	5	6	7	8	9
30,2	6,0	26,47	3,62	0,62	28,5	195	219	247	257	261	265	265	265	—
30,2	6,0	18,61	3,78	0,63	40,6	146	162	180	186	186	186	—	—	—
30,2	5,0	33,97	3,10	0,62	22,3	202	238	276	294	294	340	340	340	—
18,6	3,0	30,12	2,40	0,68	15,4	233	261	287	295	298	301	301	301	301
18,6	4,0	17,75	2,52	0,63	26,4	136	152	168	174	174	17[e]	178	—	—
18,6	6,0	10,5	4,0	0,667	44,3	88	98	106	106	106	—	—	—	—
15,0	6,0	12 31	2,52	0,63	30,5	109	115	119	123	123	123	—	—	—
25,0	5,0	22,12	3,10	0,62	28,3	179	200	209	219	221	221	221	221	—
25,0	4,0	29,50	2,48	0,62	21,2	217	247	275	289	291	295	295	295	—
25,0	6,0	16,73	4,0	0,667	37,4	133	147	161	167	167	167	—	—	—
10,0	3,0	12,84	1,86	0,62	19,45	97	117	127	127	127	128	—	—	—
15,0	3,0	25,59	1,83	0,61	14,70	177	222	244	250	251	252	256	256	256
18,0	3,0	30,81	1,83	0,61	14,60	202	265	294	303	304	307	307	309	309
24,5	4,0	30,01	2,50	0,625	20,4	175	249	279	291	292	296	300	300	300
15,0	4,0	12,81	2,52	0,63	29,2	77	85	116	128	128	128	—	—	—
26,4	6,0	21,81	3,72	0,62	30,3	147	185	206	214	214	218	218	—	—
30,8	8,0	17,07	4,96	0,62	45,2	120	148	164	166	170	170	—	—	—
25,7	7,8	12,43	5,36	0,67	51,0	86	96	112	120	124	124	—	—	—

Таблица 3

№№ опытов	a : H	$\frac{\gamma H^2}{2}$	$\gamma\frac{H_0^2}{2}$	$P_{ш}$ по формуле (11)	$P_{ш}$ по формуле (10)	$P_{ш}$ фактическая	$P_{шф} : P_0$
13	0,098	386,70	389,76	378,92	373,30	372,0	0,955
4	0,10	367,75	370,01	338,9	324,3	320,0	0,90
12	0,117	255,15	257,64	248,86	243,22	243,00	0,95
14	0,133	338,26	343,74	330,34	321,1	322,34	0,94
9	0,136	325,12	331,01	318,97	300,1	310,0	0,94
3	0,147	419,6	426,9	408,4	396,0	391,00	0,92
5	0,225	94,50	99,4	92,95	88,15	89,0	0,91
8	0,225	146,5	153,65	144,65	137,5	135,0	0,89
1	0,226	209,5	217,8	207,4	191,2	196,0	0,90
11	0,234	48,41	50,3	46,58	44,44	45,00	0,89
16	0,275	124,97	132,07	121,8	113,6	119,87	0,87
15	0,312	38,8	42,69	33,30	37,95	37,80	0,89
2	0,322	79,5	90,46	85,9	76,05	75,4	0,835
7	0,325	34,5	35,45	45,74	32,6	32,10	0,9
10	0,358	57,5	60,44	54,3	51,23	52,00	0,86
17	0,468	44,13	51,10	46,0	42,8	42,1	0,825
6	0,570	21,12	22,0	20,80	19,70	19,00	0,865
18	0,643	9,81	15,08	11,3	10,7	10,6	0,71

Усилие, приходящееся на щит, определялось площадью эпюры давления, построенной по показаниям пьезометров.

В таблице 3 приводятся величины усилий, приходящихся на плоский щит, подсчитанных по данным пьезометров, определенных

по формулам (10) и (11), и для сравнения усилия гидростатического давления без учета подходной скорости и с учетом последней.

Как видно из таблицы, получаем очень хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. То же самое получается и при сравнении с данными Гиринского (см. фиг. 3).

Армянский научно-иссл. институт
гидротехники и мелиорации

Поступило 3 VI 1954

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананян А. К.* О пропускной способности двухъярусных водосбросов. Известия АН Армянской ССР, III, № 3, 1950.
2. *Амбарцумян Г. А.* О работе А. К. Ананяна „О пропускной способности двухъярусных водосбросов". Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), № 2, 1954.
3. *Кулька Г.* Металлические затворы плотин. Москва, 1932.
4. *Гиринский Н. К.* Давление на плоский щит при истечении из-под щита. Гидр. строит., № 10, 1934.
5. *Замарин Е. А., Гиринский Н. К.* и др. Курс гидротехнических сооружений. М., 1940.
6. *Близняк Е. В., Гришина М. М.* и др. Гидротехнические сооружения, том I, М., 1936.
7. *Агроскин И. И.* Гидравлика. М., 1950.

Գ. Ս. Համբարձումյան

ՀԱՐԹ ՋՐԲՈՂ ՎԱՇԱՆԻ ՎՐԱ ԱԶԴՈՂ ՀԻԴՐՈԴԻՆԱՄԻԿ ՃՆՇՄԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՆՐԱ ՏԱԿՈՎ ՋՐԻ ԱՐՏԱՇԱՆՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հարթ ջրբող վահանի վրա ազդող ճնշման ուժի մեծության որոշումն ունի գործնական և տեսական մեծ նշանակություն։

Ժամանակակից տեխնիկական դրականության մեջ մինչև այժմ էլ ընդունված է, որ այդ ճնշման ուժի մեծությունն առանց զգալի սխալի կարելի է ընդունել բաշխման հիդրոստատիկ ճնշման օրենքի համաձայն։

Ն. Ե. Ժուկովսկին քննարկելով այս հարցը, ավել է դրա հիդրոմեխանիկական լուծումը, որոշելով ճնշման մեծությունը ջրբող վահանի ցանկացած կետում՝ նրա կամայական բացման մեծության համար [բանաձևի վերջնական մաթեմատիկական մշակումը ավել է Ն. Կ. Գիրինսկին (4)], բայց բանաձևը, չափազանց բարդ և մեծ լինելու պատճառով, հիրառություն չի գտել։

Ն. Կ. Գիրինսկին, մշակելով իր բազմաթիվ փորձերի արդյունքները, ստացել է մի փորձնական բանաձև, որի արդյունքները ճշտորեն համընկնում են փորձնական տվյալների հետ։

Կալկան—Կոխ—Կարատեևները և ուրիշները ավել են այլ տեսական լուծումներ, որոնց արդյունքներն զգալիորեն տարբերվում են փորձնական տվյալներից։

Ջրբող հարթ վահանի վրա ընդհանուր ճնշման ուժը ժամանակակից տեխնիկական դրականության մեջ առաջարկվում է որոշել հիդրոստատիկ

օրենքի հիման վրա, ճշտելով այն Ն. Կ. Գիրինսկու փորձնական տվյալներով կազմված աղյուսակի օգնությամբ (աղյուսակ 1)։

Տվյալ հոդվածում դիտելով արտահոսումը հարթ փականի տակից, կազմվել են կենդանի ուժի և շարժման քանակի հավասարումները երկու հատվածքների համար, ընդ որում մի հատվածքը վերցված է մինչև փականը, իսկ մյուսը՝ փականից հետո, սեղմված հատվածքում։

Համատեղ լուծելով այդ երկու հավասարումները, փականի վրա ազդող հիդրոդինամիկ ուժի համար ստացվել է՝

$$P_{ш} = \frac{\gamma}{2}(H - \varepsilon a)\left(H - 3\varepsilon a + \frac{2V_1^2}{g}\right).$$

Որոշելով հարթ փականին հեղուկի մոտեցման արագությունը, նայած փականի բացման չափին, և տեղադրելով նախորդ հավասարման մեջ, կստանանք՝

$$P_{ш} = \frac{\gamma H^2}{2}(1 - k)\left(1 - 3k + 4\frac{k^2}{1+k}\right),$$

որտեղ՝

$$k = \varepsilon\frac{a}{H},$$

քանի որ k-ի մեծությունը կախված է միայն ε-ից և $\frac{a}{H}$ հարաբերությունից, իսկ, ըստ Ն. Ե. Ժուկովսկու, ε-ը իր հերթին կախված է $\frac{a}{H}$-ից։ Նշանակելով

$$A = (1 - k)\left(1 - 3k + 4\frac{k^2}{1+k}\right),$$

կստանանք

$$P_{ш} = A\frac{\gamma H^2}{2}.$$

A գործակցի մեծությունը՝ կախված փականի բացման աստիճանից՝ տրված է նկ. 6-ում։

Հիդրոտեխնիկայի և մելիորացիայի հայկական գիտահետազոտական ինստիտուտի հիդրոտեխնիկական լաբորատորիայում հատուկ փորձեր են դրվել վերոհիշյալ բանաձևի ճշտությունն ստուգելու համար։ Փորձերը հաստատել են բանաձևի մեծ ճշտությունը։