

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ТРУДЫ

ВЫПУСК 36

ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИКИ ПОТОКОВ
И ВОПРОСЫ ГИДРОФИЗИКИ

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. Б. В. ПРОСКУРЯКОВА

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

ЛЕНИНГРАД

1969

234180

06
T78

В сборнике помещены научные работы из области гидрофизики и динамики русловых потоков, выполненные сотрудниками Ленинградского гидрометеорологического института.

В научных работах раздела I освещены вопросы, связанные с учетом стока взвешенных наносов, влияния на сток шероховатости, с расчетом прудов-охладителей ГРЭС, а также с исследованием процессов заторообразования.

В работах раздела II даны описание, методика и практические рекомендации по применению различных приборов и экспериментальных установок.

Сборник рассчитан на научных работников и инженеров, работающих в области гидрофизики и динамики русловых потоков.

РАЗДЕЛ I

ВОПРОСЫ ГИДРОФИЗИКИ

С. И. ДМИТРИЕВ

ИЗМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КАПИЛЛЯРНОГО ИСПАРЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАДИУСОМ И ГЛУБИНОЙ ЗОНЫ ИСПАРЕНИЯ КАПИЛЛЯРА

Для расчета интенсивности капиллярного испарения и при изучении режима высыхания капиллярно-пористых тел используются количественные соотношения, полученные в результате решения одномерной задачи диффузии паров в зоне испарения капилляра [1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и др.].

Рядом исследователей было установлено, что вычисленные по этим соотношениям (для одних и тех же условий) расчетные величины интенсивности капиллярного испарения мало отличаются друг от друга, но вместе с тем они не в полной мере согласуются с данными экспериментов [8]. Были предприняты попытки установить причины этого несоответствия, однако до настоящего времени вопрос не получил полного решения.

Применительно к рассматриваемой задаче уравнение диффузии можно записать в следующем виде:

$$i_{z=0} = -D_p \frac{p_l - p_0}{l}, \quad (1)$$

где $i_{z=0}$ — интенсивность капиллярного испарения, г/см сек;

D_p — коэффициент пропорциональности, величина которого выра-

жается соотношением $D_p = D \frac{\mu}{RT}$;

D — коэффициент диффузии паров (при наблюдаемой абсолютной температуре T и атмосферном давлении P_0);

μ — молекулярный вес жидкости;

R — универсальная газовая постоянная;

l — расстояние от устья капилляра до мениска жидкости в нем (рис. 1);

p_0 и p_l — упругость паров жидкости в поперечных сечениях капилляра соответственно у его устья ($z = 0$) и непосредственно над мениском жидкости ($z = l$).

Использование уравнения (1) для расчета капиллярного испарения предусматривает принятие двух следующих допущений: 1) допущения об одномерном характере передвижения паров в зоне испарения капилляра (т. е. считают, что упругость паров в любом поперечном сечении капилляра от точки к точке не изменяется и 2) допущения, сводящегося к тому, что величина упругости паров в направлении от мениска

к устью капилляра изменяется по линейному закону. Такое представление о поле упругости паров в зоне испарения капилляра является весьма схематичным. Совершенно очевидно, что в действительности упругость паров является функцией радиуса капилляра. Не исключено также, что в капилляре на уровнях $z > 0$ градиенты упругости паров жидкости (dp/dz) при определенных условиях могут значительно отличаться по своей величине от градиента упругости паров на уровне $z = 0$. Следовательно, если к такому случаю применять формулу (1), т. е. подставляя в нее численные значения коэффициента D_p и сомно-

жителя $\frac{p_l - p_0}{l}$ (некоторая средняя для зоны испарения величина градиента упругости паров), то в результате расчета в конечном итоге будет получена величина $i_{z=0}$, отличная от фактической интенсивности капиллярного испарения. Этими обстоятельствами, по-видимому, и объясняется тот факт, что величины $i_{z=0}$, вычисленные по уравнению (1), могут быть значительно ниже численных значений этих же характеристик, полученных при соответствующих условиях в ходе опытов (табл. 1).

Ряд авторов [3, 8, 10] считает, что уравнение (1) может быть использовано для оценки интенсивности диффузии паров из зоны испарения капилляра в случае, когда имеет место соотношение $r_k \ll l$. Для

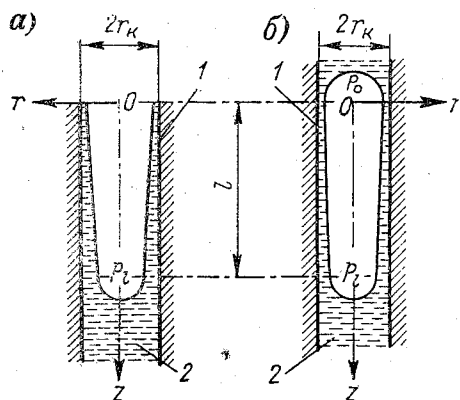


Рис. 1. Схемы различных случаев состояния увлажнения цилиндрического капилляра:

1 — стенка капилляра; 2 — жидкость

высыхания тех капиллярно-пористых тел, размеры пор которых характеризуются соотношением $r_k \approx l$.

В работе [4] приведено описание теории капиллярного испарения разработанной автором, исходя из представлений о пространственном (неоднородном) характере передвижения паров в зоне испарения цилиндрического капилляра. То есть в отличие от предшествующих теорий капиллярного испарения, было учтено, что в рассматриваемой зоне (см. рис. 1) величина упругости паров жидкости изменяется не только в направлении оси oz , но и в радиальном направлении (ось or), интенсивность диффузии паров в любой точке $M(z, r)$ зоны выражается уравнением

$$i_{z,r} = -D_p \frac{\partial p}{\partial n}, \quad (2)$$

где $\vec{n}$ — нормаль, проведенная в точке $M(z, r)$ к произвольно выбранной элементарной площадке, к которой в этой точке линия тока паров подходит ортогонально.

В результате решения пространственной задачи диффузии паров жидкости в цилиндрическом капилляре было получено выражение для интенсивности потока паров в сечениях $z = 0$ и $z = l$ капилляра в следующем виде:

$$i_z = -\frac{D_p}{\pi r_k^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_k} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_z d\varphi r dr =$$

$$= -2D_p \frac{p_2 - p_1}{r_k} \left[- \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_0(\beta_n) \operatorname{ch} \left(\frac{l-z}{r_k} \right) \beta_n}{\operatorname{sh} \left(\frac{\beta_n}{r_k/l} \right)} + \right. \quad (3)$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \frac{J_1(\beta_n) \operatorname{ch} \left(\frac{\beta_n}{r_k/l} \right)}{\operatorname{sh} \left(\frac{\beta_n}{r_k/l} \right)} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \frac{n\pi z}{l} \frac{I_1 \left(\frac{n\pi r_k}{l} \right)}{I_0 \left(\frac{n\pi r_k}{l} \right)} \right],$$

где

$$A_n = \frac{2}{r_k^2 J_1^2(r_k \alpha_n)} \int_0^{r_k} r \Phi_1(r) J_0(r \alpha_n) dr,$$

$$C_n = \frac{2}{l} \int_0^l \Psi(z') \sin \frac{n\pi z'}{l} dz', \quad (4)$$

$$B_n = \frac{2}{r_k^2 J_1^2(r_k \alpha_n)} \int_0^{r_k} r \Phi_2(r) J_0(r \alpha_n) dr,$$

α_n — положительные корни уравнения $J_0(r_k \alpha_n) = J_0(\beta_n) = 0$;

J — функция Бесселя первого рода;

I — функция Бесселя от мнимого аргумента;

$\Phi_1(r), \Psi(z), \Phi_2(r)$ — функции, выражающие характер изменения величины P_z, r на границах зоны испарения капилляра;

p_1 и p_2 — численные значения p_z, r в характерных точках сечений капилляра соответственно на уровнях $z = 0$ и $z = l$.

Исходя из уравнения (3), выражение для интенсивности капиллярного испарения ($z = 0, p_1 = p_0, r_k, p_2 = p_l$) можно представить в следующем виде:

$$i_{z=0} = K_{z=0} D_p \frac{p_l - p_0}{l}, \quad (5)$$

где

$$K_{z=0} = \frac{2}{r_k/l} \frac{p_l - p_{0,r_k}}{p_l - p_0} \left[- \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(\beta_n)}{\text{th} \left(\frac{\beta_n}{r_k/l} \right)} + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \frac{J_1(\beta_n)}{\text{sh} \left(\frac{\beta_n}{r_k/l} \right)} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{I_1(n\pi r_k/l)}{I_0(n\pi r_k/l)} \right] \quad (6)$$

В результате решения пространственной задачи диффузии паров в зоне испарения капилляра, имеющего прямоугольную форму поперечного сечения (рис. 2), нами получено выражение для коэффициента $K_{z=0}$ следующего общего вида:

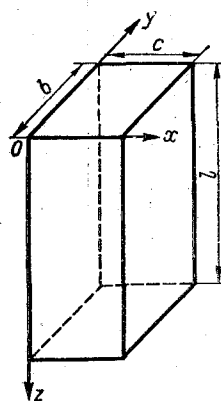


Рис. 2. Схема капилляра, имеющего поперечное сечение прямоугольной формы

$$K_{z=0} = \frac{p_l - p_{0,r_k}}{p_l - p_0} \frac{l}{bc} \cdot \\ \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m}{\lambda_n} \frac{1 - \cos(\lambda_l \cdot c)}{V \lambda_n^2 + \mu_m^2} \left[A_{m,n} \left(e^{V \lambda_n^2 + \mu_m^2 b} - 1 \right) - \right. \right. \\ \left. - B_{m,n} \left(1 - e^{-V \lambda_n^2 + \mu_m^2 b} \right) \right] + \\ + \frac{16}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{V \lambda_m^2 + \nu_n^2}{m \cdot n \cdot \nu_m \cdot \lambda_n} \times \\ \times \frac{[\cos(\nu_m \cdot b) - 1] [\cos(\lambda_n \cdot c) - 1]}{\text{sh}(V \lambda_m^2 + \nu_n^2 l)} - \\ - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\nu_m \cdot \lambda_n} V \sqrt{\frac{n^2}{c^2} + \frac{m^2}{b^2}} [\cos(\nu_m \cdot b) - 1] [\cos(\lambda_n \cdot c) - 1] \times \\ \times \left[C_{m,n} \cdot \text{ch} \left(\sqrt{\frac{n^2}{c^2} + \frac{m^2}{b^2}} \pi l \right) - D_{m,n} \right] \right\}, \quad (7)$$

где

$$A_{m,n} = \frac{4}{cb} \frac{\int_0^c \int_0^b \Phi_1(x', y') \cdot \sin(\lambda_n x') \cdot \sin(\mu_m y') dx' dy'}{\text{sh} \left[\sqrt{\frac{m^2}{c^2} + \frac{n^2}{b^2}} l \pi \right]}, \\ B_{m,n} = \frac{4}{cb} \frac{\int_0^c \int_0^b \Phi_2(x', y') \cdot \sin(\lambda_n x') \cdot \sin(\mu_m y') dx' dy'}{\text{sh} \left[\sqrt{\frac{m^2}{c^2} + \frac{n^2}{b^2}} l \pi \right]},$$

$$C_{m,n} = \frac{4}{n\pi l} \frac{1 - \exp(-\sqrt{\lambda_n^2 + \nu_m^2} b)}{\operatorname{sh} [\sqrt{\lambda_n^2 + \nu_m^2} b]} \int_0^l \Psi(z') \sin(\nu_n z') dz',$$

$$D_{m,n} = \frac{4}{n\pi l} \frac{\exp(\sqrt{\lambda_n^2 + \nu_m^2} b) - 1}{\operatorname{sh} [\sqrt{\lambda_n^2 + \nu_m^2} b]} \int_0^l \Psi(z') \sin(\nu_n z') dz',$$

$$\lambda_m = \frac{m\pi}{c}, \quad \mu_m = \frac{m\pi}{l}, \quad \nu_m = \frac{m\pi}{b},$$

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{c}; \quad \mu_n = \frac{n\pi}{l}, \quad \nu_n = \frac{n\pi}{b}.$$

С формальной точки зрения, различие между уравнениями (1) и (5) состоит в том, что в последнее входит безразмерный коэффициент $K_{z=0} \geq 1$. По существу же уравнение (5) выгодно отличается тем, что посредством входящего в него теоретического коэффициента $K_{z=0}$, как это следует из выражения (6), учитывается изменение величины $i_{z=0}$ в зависимости от целого ряда факторов, обуславливающих интенсивность процесса капиллярного испарения (форма капилляра, соотношение между поперечным и продольным размерами зоны испарения, граничные условия задачи).

Из уравнений (5) и (6) следует, что при прочих равных условиях величина $i_{z=0}$ зависит от радиуса капилляра и от соотношения r_k/l , т. е. теоретическим путем установлено, что существует зависимость между величинами $i_{z=0}$ и r_k , при этом эта зависимость не является однозначной¹.

Получим выражение для коэффициента $K_{z=0}$ в формуле (6) применительно к следующим краевым условиям задачи:

$$\left. \begin{aligned} f_1(r) &= p_{0,0} + (p_{0,r_k} - p_{0,0}) \frac{r}{r_k}; & f_2(r) &\approx p_l; \\ \psi(z) &= p_{0,r_k} + (p_l - p_{0,r_k}) \frac{z}{l}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Соответственно выражения для функций $\Phi_1(r)$, $\Phi_2(r)$ и $\Psi(z)$ в соотношениях (4) будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } z=0, \quad 0 < r < r_k, & \quad \Phi_1(r) = - \frac{p_{0,r_k} - f_1(r)}{p_{l,r_k} - p_{0,r_k}}; \\ \text{при } z \geq 0, \quad r = r_k, & \quad \Psi(z) = - \frac{p_{0,r_k} - \psi(z)}{p_{l,r_k} - p_{0,r_k}}; \\ \text{при } z=l, \quad 0 \leq r < r_k, & \quad \Phi_2(r) = - \frac{p_{0,r_k} - f_2(r)}{p_{l,r_k} - p_{0,r_k}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

¹ Следовательно, при изучении интенсивности испарения с поверхности капиллярно-пористых сред нельзя ограничиваться рассмотрением лишь суммарной пористости среды. При решении этой задачи необходимо также оценивать и особенности пористого пространства (поперечный и продольный размеры пор, форму их поперечного сечения).

С учетом соотношений (8) и (9) значения постоянных A_n, B_n, C_n , входящих в уравнение (4), определяется следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} A_n &= -\frac{2}{J_1^2(\beta_n)} \frac{p_{0,r_k} - p_{0,0}}{p_l - p_{0,r_k}} \int_0^{r_k} \frac{r}{r_k} \left(1 - \frac{r}{r_k}\right) J_0\left(\beta_n \cdot \frac{r}{r_k}\right) d\left(\frac{r}{r_k}\right); \\ B_n &= \frac{2}{\beta_n J_1(\beta_n)}; \quad C_n = -2 \frac{(-1)^n}{n\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Решая затем совместно выражения (6) и (10), получим

$$\left. \begin{aligned} K_{z=0} &= \frac{4}{r_k/l} \left[\frac{p_{0,r_k} - p_{0,0}}{p_l - p_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^{r_k} \frac{r}{r_k} \left(1 - \frac{r}{r_k}\right) J_0\left(\frac{r}{r_k} \cdot \beta_n\right) d\left(\frac{r}{r_k}\right)}{\operatorname{th}\left(\frac{\beta_n}{r_k/l}\right) J_1(\beta_n)} + \right. \\ &+ \left. \frac{p_l - p_{0,r_k}}{p_l - p_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n \operatorname{sh}\left(\frac{\beta_n}{r_k/l}\right)} - \frac{p_l - p_{0,r_k}}{p_l - p_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n I_1(n\pi r_k/l)}{n\pi I_0(n\pi r_k/l)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

По уравнению (11) был выполнен расчет величин $K_{z=0}$ для различных значений r_k/l при условии (рис. 1б) $p_{0,r_k} = p_{0,0} = p_0$.

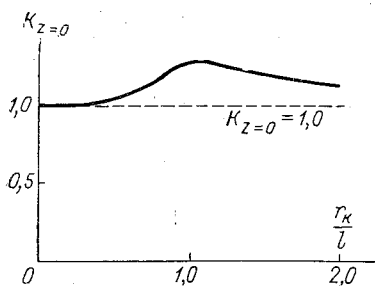


Рис. 3. Изменение численного значения коэффициента $K_{z=0}$ в зависимости от соотношения поперечного и продольного размеров зоны испарения капилляра (для конкретных граничных условий задачи)

Результаты выполненных подсчетов изображены на рис. 3 в виде зависимости $K_{z=0} = F(r_k/l)$.

Из этой графической зависимости следует, что при больших численных значениях r_k/l величины $K_{z=0}$ существенно отличаются от единицы, и, наоборот, $K_{z=1} = 1$, если имеет место $r_k \ll l$. Отсюда следует, что при значениях r_k/l выше определенной величины (в рассматриваемом примере такой величиной является $r_k/l \approx 1$) задачу по расчету интенсивности капиллярного испарения надо решать как пространственную, так как использование в этом случае уравнения диффузии (1) связано с большими погрешностями.

На основе приведенных выше теоретических зависимостей проанализируем данные экспериментов по изучению интенсивности капиллярного испарения. Данные таких опытов ряда исследователей приведены в монографии С. В. Нерпина и А. Ф. Чудновского [8, стр. 219].

При рассмотрении вопросов теории капиллярного испарения эти авторы оперируют понятием о линейной скорости испарения из капилляров (U), которая выражается через интенсивность капиллярного испарения посредством следующего соотношения:

$$U = l \cdot i_{z=0}. \quad (12)$$

При этом, в отличие от экспериментального значения линейной скорости испарения U , расчетную величину этой характеристики, соответствующую расчетной величине $i_{z=0}$, Нерпин и Чудновский обозначают символом U_v .

В результате сопоставления заимствованных из монографии (8) численных значений U и U_v (соответствующих друг другу по условиям опыта), нами получены величины коэффициентов K , которые приведены в следующей таблице.

Таблица 1

Экспериментальные и теоретические величины линейной скорости испарения, подсчитанные по данным опытов с капиллярами различных поперечных размеров

r_k см	10^{-2}	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
t °C	20,0	23,0	25,0	21,5	23,0
$\varphi = p_0/p_l$	0,95	0,68	0,67	0,40	0,63
$U \cdot 10^6$ см ² /сек	0,45	3,2	3,4	3,4	2,06
$U_v \cdot 10^6$ см ² /сек по уравнению (1)	0,22	2,0	2,12	2,93	2,02
$K = \frac{U}{U_v}$	2,05	1,6	1,6	1,16	1,02

Примечание. В дальнейшем мы принимаем экспериментальную величину K , равной величине $K_{z=0}$, вычисленной по уравнению (6), так как считаем, что последнее должно точно описывать процесс капиллярного испарения в количественном отношении.

К сожалению, мы не имеем возможности сопоставить между собой все численные значения K , полученные на основе данных опытов (табл. 1) и вычисленные по уравнению (6), так как не располагаем полными данными о численных значениях параметров l , имевших место в указанных выше опытах. Однако некоторый анализ данных этих экспериментов на основе изложенной выше теории нами все же был проделан и описание его приводится ниже.

Опыты с капиллярами радиусом $r_k = 5,0 \cdot 10^{-2}$ см, $r_k = 2,5 \cdot 10^{-2}$ см и $r_k = 4,5 \cdot 10^{-5}$ см были выполнены при соблюдении примерно одинаковых внешних условий (температура и влажность воздуха). Имея в виду, что для капилляров указанных радиусов, согласно данным опыта, $i_{z=0}$ являются величинами примерно одного порядка, а численные значения U приблизительно равны между собой (см. табл. 1), на основании уравнения (12) приходим к выводу, что в ходе опытов как с узкими, так и широкими капиллярами параметры l должны были быть величинами примерно одного и того же порядка. Следовательно, для капилляров более узких было характерно соотношение $r_k \ll l$, а для более широких капилляров параметры r_k и l были сопоставимы по величине.¹

¹ Действительно, если обратиться к работе Н. П. Федякина [9], то можно убедиться в том, что данным его опытов, помещенным в табл. 1 (см. капилляры радиусов $r_k = 5 \cdot 10^{-5}$ см и $r_k = 4,5 \cdot 10^{-5}$ см) соответствуют значениям $l > 0,01$ см. То есть в этих опытах имело место отношение $r_k/l < 5 \cdot 10^{-3}$ см.

Между тем, как уже отмечалось выше при рассмотрении теории вопроса (см. уравнение (6) и график на рис. 3), если в капилляре поперечный размер зоны испарения значительно меньше продольного ($r_k \ll l$), то процесс диффузии паров в этой зоне можно приближенно рассматривать как одномерный и расчет величины $i_{z=0}$ вести по уравнению диффузии (1). И наоборот, последнее нельзя использовать для определения интенсивности капиллярного испарения применительно к тем опытам, в условиях которых параметры r_k и l сопоставили по величине, так как в этих случаях в зоне испарения капилляров движение паров имеет ярко выраженный пространственный (неодномерный) характер.

Отсюда становится понятным, почему расхождение между величинами капиллярного испарения, полученными экспериментальным путем и вычисленными по уравнению одномерной диффузии (см. табл. 1) являются для узких капилляров сравнительно небольшими ($K_{z=0} = 1,16$; $K_{z=0} = 1,02$), а для широких капилляров очень значительными ($K_{z=0} = 2,05$ и $K_{z=0} = 1,6$).

Согласно уравнению (6), например, для случая $r_k/l = 0,5$ величина коэффициента $K_{z=0}$ может изменяться в довольно широких пределах, достигая при этом величины $K_{z=0} = 2,0$ и даже более высоких численных значений (в зависимости от характера граничных условий задачи).

Таким образом, опыты подтверждают, что во всех случаях, подобных случаю с широкими капиллярами (см. табл. 1), расчет интенсивности капиллярного испарения с достаточной точностью может быть выполнен только на основе уравнения (5), учитывающего не одномерный характер движения паров в зоне испарения капилляра.

Выводы

1. Получено теоретическое уравнение для расчета интенсивности испарения жидкости из капилляра (при любых граничных условиях задачи).
2. Установлено, что интенсивность капиллярного испарения в значительной мере зависит от величины радиуса и соотношения поперечного и продольного размеров зоны испарения капилляра.
3. Полученное уравнение (для расчета капиллярного испарения) дает возможность установить пределы применимости уравнения одномерной диффузии для исследования испарения из капилляров различных размеров и при различных граничных условиях задачи. Последнее может быть использовано лишь в тех случаях, когда в капилляре поперечный размер зоны испарения значительно меньше по величине ее продольного размера (глубины).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балаев Л. Г. Результаты экспериментальных исследований испарения воды с поверхности капиллярных менисков. Почвоведение, № 2, 1963.
2. Глобус А. М., Могилевский Б. М. К вопросу о массообмене между потоками жидкости и пара при испарении из капилляров. ИФЖ, вып. 11, № 2, 1966.
3. Дерягин Б. В., Нерпин С. В., Чураев Н. В. Теория испарения жидкости из капилляров с учетом пленочного движения влаги. Сб. Трудов АФИ, вып. 11, 1965.

4. Дмитриев С. И. Теория капиллярного испарения, основанная на решении пространственной задачи диффузии паров в капиллярах. В кн. «Тепло- и массоперенос», т. 6, ч. 1, изд-во «Наукова думка», Киев, 1968.
 5. Кришер О. Научные основы техники сушки. Изд. ИЛ, 1961.
 6. Лебедев В. К. Испарение жидкости из сообщающихся капилляров и основной закон перемещения влаги в капиллярнопористом теле. ЖТФ, т. 26, 1064, 1956.
 7. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. ГИТТЛ, М., 1954.
 8. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почв. Изд. Наука, М., 1967.
 9. Федякин Н. Н. Диффузия паров в капиллярах. Изв. Высших учебных заведений. Физика. № 3, 1962.
 10. Чураев Н. В. Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах. ДАН СССР, 148, № 6. 1963.
 11. Stefan J. Über das Gleichgewicht u. d. Diffusion von Gasgemengen Sitzungsber. Akad. wiss, Wien, abt. 2, 1871.
-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ И ГРАВИТАЦИОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СЛОИСТЫХ ГРУНТАХ

При выводе основного уравнения движения жидкости, находящейся под одновременным действием только двух факторов — электрического и гравитационного полей, принимается справедливым принцип независимости их действия — принцип суперпозиции. Формула для скорости фильтрации при этом имеет следующий вид:

$$\bar{v} = -k_{\phi} \text{grad} (H + H_{\circ}), \quad (1)$$

где k_{ϕ} — коэффициент гидравлической фильтрации среды;
 H — гидравлический напор;

$H_{\circ} = \frac{k_{\circ}}{k_{\phi}} U$ — электроосмотический напор, т. е. перепад «давления», создаваемого электрическим полем;
 $k_{\circ}$ — коэффициент электроосмоса;¹
 U — электрическая разность потенциалов.

В последние годы некоторые исследователи [3, 4, 6, 7], ссылаясь на результаты своих опытов, взяли под сомнение принцип суперпозиции электрического и гравитационного полей при их одновременном действии на глинистые грунты. Высказывалось предложение, что коэффициент фильтрации этих грунтов возрастает под действием электрического поля. В то же время имеются данные [2], подтверждающие применимость принципа суперпозиции полей. В работах [8, 9] была подтверждена справедливость принципа суперпозиции для изотропной пористой среды, в том числе для однородных глинистых грунтов.

На практике, однако, часто приходится иметь дело с анизотропными, слоистыми грунтами, поэтому представляло интерес провести исследование взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации и в слоистых грунтах. Одним из часто встречающихся видов анизотропии является слоистый грунт, в котором можно выбрать два взаимно-перпендикулярных направления с наибольшим ($k_{\phi \max}$) и наименьшим ($k_{\phi \min}$) коэффициентами фильтрации. Теорию гидравлической фильтрации для таких грунтов разработали Дахлер [10] (для случая, когда проекции плоскостей раздела — параллельные прямые) и В. И. Аравин [1] (для более сложных видов слоистости).

¹ Электроосмосом называется явление движения жидкости (электролита) через пористую среду под действием внешнего электрического поля.

Расчет электроосмотической и напорной фильтрации в анизотропных средах сделал А. В. Нетушил [5]. Он также рассмотрел и условия моделирования (методом ЭГДА) для нахождения поля пьезометрического напора. Основные положения теории Нетушила состоят в следующем. Пусть имеется среда, состоящая из горизонтальных слоев с различными фильтрационными и электроосмотическими свойствами. Толщина одного слоя, его удельная электропроводность, коэффициент фильтрации и коэффициент электроосмоса обозначаются соответственно d' , γ' , k'_ϕ и k'_ε , а для другого слоя d'' , γ'' , k''_ϕ и k''_ε . Если число таких чередующихся слоев велико и закон чередования один и тот же, то при геометрических размерах рассматриваемых объемов грунта, значительно превышающих толщины слоев, можно ввести в рассмотрение некоторые средние значения k_ϕ , k_ε и γ . Осреднение этих параметров и приводит к замене неоднородного изотропного грунта однородным анизотропным.

С помощью представления о последовательном и параллельном соединении слоев можно подсчитать средние значения этих параметров в касательном (τ) и нормальном к плоскостям раздела слоев (n) направлениях (рис. 1).

В касательном направлении параметры выражаются следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_\tau &= \frac{\gamma' d' + \gamma'' d''}{d' + d''}, \\ k_{\phi \tau} &= \frac{k'_\phi d' + k''_\phi d''}{d' + d''}, \\ k_{\varepsilon \tau} &= \frac{k'_\varepsilon d' + k''_\varepsilon d''}{d' + d''}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

а в направлении, нормальном к слоям:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &= \frac{\gamma' \gamma'' (d' + d'')}{\gamma' d'' + \gamma'' d'}, \\ k_{\phi n} &= \frac{k'_\phi k''_\phi (d' + d'')}{k'_\phi d'' + k''_\phi d'}, \\ k_{\varepsilon n} &= \frac{(k'_\varepsilon k''_\phi \gamma'' d' + k''_\varepsilon k'_\phi \gamma' d'') (d' + d'')}{(k'_\phi d' + k''_\phi d'') (\gamma' d' + \gamma'' d'')} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Формула для $k_{\varepsilon n}$ по виду сильно отличается от формулы для $k_{\phi n}$, так как при ее выводе пришлось учесть то обстоятельство, что наложение на слоистый грунт электрического поля в направлении n приводит к изменению пьезометрического поля внутри этого грунта.

Перед исследованием основной задачи интересным оказалось проверить эту теорию на лабораторной модели слоистого грунта. В качестве объекта исследования использовалась модель слоистого грунта, состоящая из параллельных слоев кембрийской глины и мелкозерни-

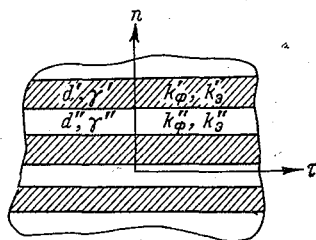


Рис. 1. Модель слоистого грунта

стого песка. На опыте измерялась удельная электропроводность γ каждого из них, а также коэффициенты фильтрации и электроосмоса k_{ϕ} и k_{ε} .

В табл. 1 приведены вычисленные по экспериментальным данным значения коэффициентов фильтрации и электроосмоса кембрийской глины и песка в отдельности.

Приведенные результаты опытов интересны тем, что они подтвердили независимость действия на исследуемый однородный водонасыщенный грунт электрического и гравитационного полей, т. е. их аддитивность, в пределах исследованных градиентов.

При вычислении усредненных параметров по направлениям n и τ по формулам (2) и (3) в модели слоистого грунта значения с одним штрихом будут относиться к глине, с двумя — к песку. Учитывая, что во всех опытах с этим образцом $d' = d'' = d$ (кроме одного случая, когда $d'' = 3 d'$, $k_{\varepsilon \text{ песка}} = 0$) и что можно во всех суммах пренебречь k_{ϕ} по сравнению с k_{ϕ}' (табл. 1), получим:

$$k_{\phi n} = 2k_{\phi}' = 2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-8} = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек},$$

$$k_{\varepsilon n} = \frac{2k_{\varepsilon}'\gamma''}{\gamma'' + \gamma'} = \frac{2 \cdot 7,9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3}{1,5 + 0,3} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{в сек},$$

$$\gamma_n = \frac{2\gamma'\gamma''}{\gamma' + \gamma''} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 0,3}{1,8} = 0,5 \text{ ммо} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1}\text{см}^{-1},$$

$$k_{\phi \tau} = \frac{k_{\phi}''}{2} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ см/сек},$$

$$k_{\varepsilon \tau} = \frac{k_{\varepsilon}'}{2} = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек},$$

$$\gamma_{\tau} = \frac{\gamma' + \gamma''}{2} = \frac{1,5 + 0,3}{2} = 0,9 \text{ ммо} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1}\text{см}^{-1}.$$

Сравнивая величины γ_n , $k_{\varepsilon n}$ и $k_{\phi n}$ с γ_{τ} , $k_{\varepsilon \tau}$ и $k_{\phi \tau}$, можно видеть, что степень анизотропии для первых двух величин оказывается невелика и лежит в пределах от 1 до 2, действительно,

$$\frac{\gamma_{\tau}}{\gamma_n} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}} = 1,8 \quad \text{и} \quad \frac{k_{\varepsilon \tau}}{k_{\varepsilon n}} = \frac{3,8 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-5}} \approx 1,5.$$

Влияние же анизотропии на коэффициент фильтрации слоистого грунта в нашем случае очень велико. Это видно из отношения

$$\frac{k_{\phi \tau}}{k_{\phi n}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{6,8 \cdot 10^{-8}} = 3,7 \cdot 10^3.$$

Поэтому интересно было исследовать, изменится ли это отношение после одновременного приложения к слоистому грунту электрического поля и гидравлического напора и если изменится, то какой из коэффициентов — $k_{\phi \tau}$ или $k_{\phi n}$ — подвергнется большому влиянию электрического поля.

Были проделаны опыты сперва с перпендикулярным расположением плоскостей раздела слоев к направлению скорости фильтрации и электроосмоса, а затем при их параллельном расположении относительно направления потоков фильтрации и электроосмоса.

Коэффициенты фильтрации и электроосмоса

№ серии опыта	$E \frac{в}{см}$	$grad H$	$q_{\Phi} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\Phi+\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\Phi-\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\Phi\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$k_{\Phi} \frac{см}{сек}$	$k_{\varepsilon} \frac{см^2}{в \cdot сек}$	$k_{\Phi\varepsilon} \frac{см}{сек}$	$\frac{k_{\Phi\varepsilon}}{k_{\Phi}}$
---------------------	------------------	----------	-----------------------------	------------------------------------	---	---	--	---------------------------	--	--------------------------------------	--

К е м б р и й с к а я г л и н а

1	0,25	38	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$-2,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	1,2
2	0,25	38	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$-2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0,8
3	0,5	38	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$-4,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0,8
4	0,5	38	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$-4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	1,2

П е с о к

1	1	5,6	0,1	0	0	0	0	$5,1 \cdot 10^{-4}$	0	0	
2	2	5,6	0,1	0	0	0	0	$5,1 \cdot 10^{-4}$	0	0	

Примечания: В качестве исследуемых грунтов брались кембрийская глина и среднезернистый (лужский) песок. Влажность глины $W_r = 38\%$, влажность песка $W_n = 25\%$. Фильтрующей жидкостью служила водная вытяжка из кембрийской глины. E — напряженность электрического поля; q_{Φ} — удельный расход воды при действии гидравлического напора; q_{ε} — удельный расход воды при электроосмосе; $q_{\Phi+\varepsilon}$ — удельный расход воды при одновременном действии в одном направлении электрического поля и гидравлического напора; $q_{\Phi-\varepsilon}$ — удельный расход воды при одновременном действии электрического поля и гидравлического напора, но в противоположных направлениях.

Для проведения исследования взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации в слоистых грунтах использовался электроосмометр, описанный ранее [8], с измененной обоймой.

В том случае, когда плоскости раздела слоев были перпендикулярны к направлению скорости фильтрации, обойма состояла из секций в виде колец из органического стекла с внутренним диаметром $d = 5 \text{ см}$ и шириной $l = 1,2 \text{ см}$, в которые и помещался изучаемый грунт.¹ После уплотнения в компрессионном приборе эти секции-кольца с водонасыщенным грунтом вставлялись в прибор. Между секциями прокладывался слой фильтровальной бумаги.

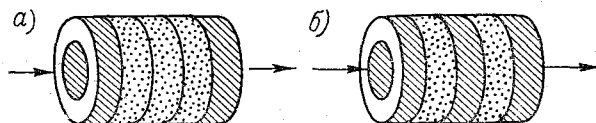


Рис. 2. Модели, отличающиеся толщиной прослойки песка и чередованием слоев

Опыты были поставлены для двух моделей, отличающихся толщиной прослойки песка и чередованием слоев (рис. 2). На рис. 2а секции составлены таким образом, что две крайние содержат водонасыщенную глину, а три средние — песок, т. е. $d'' = 3d'$, на рис. 2б — три слоя глины чередовались с двумя слоями песка. Такие модели были взяты для того, чтобы выяснить, как влияет толщина прослойки того или иного грунта на взаимодействие электроосмотической и гравитационной фильтрации.

Для проведения опытов на модели слоистого грунта при параллельном направлении скорости фильтрации и электроосмоса относительно плоскостей раздела слоев использовалась обойма в виде куба, составленного из параллелепипедальных секций (рис. 3). Две боковые противоположные грани были перфорированы.

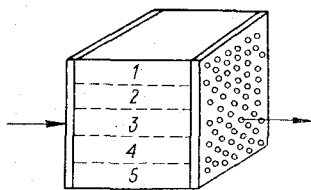


Рис. 3. Обойма со слоистым грунтом

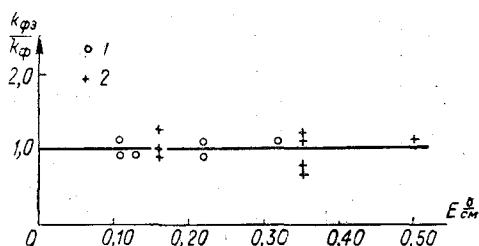


Рис. 4. Зависимость отношения $K_{фэ}/K_{ф}$ от напряженности электрического поля для слоистых грунтов:

1 — для перпендикулярной потоку слоистости; 2 — для параллельной потоку слоистости

Исследование взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации на модели слоистого грунта при перпендикулярном расположении плоскостей раздела слоев к потоку жидкости показало, что так же, как и в однородных грунтах, действующее электрическое поле не приводило к возрастанию коэффициента фильтрации (табл. 2 и рис. 4).

¹ Для лучшего контакта водонасыщенного грунта со стенками и для предупреждения пристенной фильтрации жидкости на внутренней поверхности колец была сделана нарезка глубиной 1 мм.

254780

Таблица 2

Коэффициенты фильтрации и электроосмоса

№ серии опыта	grad H	$E \frac{в}{см}$	$q_{\phi} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\phi+\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\phi-\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\phi\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$k_{\phi n} \frac{см}{сек}$	$k_{\varepsilon n} \frac{см^2}{в сек}$	$k_{\phi\varepsilon n} \frac{см}{сек}$	$\frac{k_{\phi\varepsilon n}}{k_{\phi n}}$
---------------------	----------	------------------	-----------------------------	------------------------------------	---	---	--	-----------------------------	--	--	--

М о д е л ь а

1	16	0,13	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$-2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	0,96
2	29	0,32	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	-10^{-4}	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	1,1

М о д е л ь б

1	20	0,11	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$-3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	1,1
2	20	0,11	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$-3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-8}$	0,93
3	20	0,22	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$-8,3 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	1,1
4	20	0,22	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$-8,8 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	0,89

БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

Сумма удельных расходов жидкости при раздельном действии электрического поля и гидравлического градиента равна удельному расходу при их совместном действии, что говорит о независимости их действия.

Если сопоставить вычисленные по формулам (3) величины с полученными экспериментальными данными, то получается следующая картина (табл. 3).

Таблица 3

Сопоставление вычисленных коэффициентов с экспериментальными

Коэффициент	Модель а		Модель б	
	теоретическое значение	опытное значение	теоретическое значение	опытное значение
$k_{\phi n} \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$
$k_{\varepsilon n} \frac{\text{см}^2}{\text{в сек}}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Из данных табл. 3 следует, что величина $k_{\phi n}$ для обеих моделей возрасла по сравнению с $k_{\phi \text{ глины}} = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек}$, что хорошо согласуется с теорией А. В. Нетушила. Величина $k_{\varepsilon n}$ уменьшилась по сравнению с $k_{\varepsilon \text{ глины}} = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{в сек}$, что также соответствует теории.

Однако имеется расхождение между опытными и теоретическими значениями $k_{\phi n}$ и $k_{\varepsilon n}$ в небольших пределах. Это объясняется тем, что теория выведена для случая, когда толщина слоев различных грунтов мала по сравнению с рассматриваемым объемом грунта. В наших опытах она сравнима с толщиной образца и поэтому эти расхождения вполне обоснованы.

Толщина песчаной прослойки определенным образом повлияла и на $k_{\phi n}$ и на $k_{\varepsilon n}$ в том направлении, что с ее уменьшением (при переходе от модели а к модели б) значение k_{ϕ} несколько уменьшалось, значение же k_{ε} возросло в 1,4 раза.

Результаты исследования взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации при параллельном направлении скорости фильтрации и электроосмоса относительно плоскостей раздела слоев приведены в табл. 4 и на рис. 4.

Основной вывод, который позволяет сделать анализ данных табл. 4, состоит в том, что и в случае параллельной слоистости по отношению к направлению фильтрации и электроосмоса алгебраическая сумма удельных расходов ($q_{\phi} \pm q_{\varepsilon}$) при раздельном действии электрического поля и гидравлического напора равна удельному расходу ($q_{\phi \pm \varepsilon}$) при их совместном действии на грунт.

Различие в значениях коэффициентов фильтрации k_{ϕ} обусловлено тем, что при малых значениях градиентов напора имеет место большая погрешность измерений.

Результаты исследования взаимодействия электрической и гравитационной фильтрации

№ серии опыта	grad H	$E \frac{в}{см}$	$q_{\phi} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\phi+\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\phi-\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$q_{\phi\varepsilon} \frac{см^3}{сек}$	$k_{\phi\tau} \frac{см}{сек}$	$k_{\varepsilon\tau} \frac{см^2}{в сек}$	$k_{\phi\varepsilon\tau} \frac{см}{сек}$	$\frac{k_{\phi\varepsilon\tau}}{k_{\phi\tau}}$
1	1	0,16	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	1,2
2	1	0,16	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	1,0
3	1	0,16	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	0,9
4	2	0,16	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	0,9
5	2	0,16	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	1,1
6	2	0,16	10^{-3}	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	1,0
7	1	0,35	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	1,1
8	1	0,35	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	10^{-4}	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	0,8
9	2	0,35	10^{-3}	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	0,7
10	2	0,35	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1,2
11	1	0,5	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1,1
12	2	0,5	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	1,1

Сопоставление вычисленных по формулам (2) и опытных значений $k_{ф\tau}$ и $k_{э\tau}$ для случая параллельной слоистости относительно направления фильтрации приведены в табл 5.

Таблица 5

Сопоставление вычисленных и опытных значений коэффициентов

Коэффициент	Теоретическое значение	Опытное значение
$k_{ф\tau} \frac{см}{сек}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
$k_{э\tau} \frac{см^2}{в сек}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$

Как видно из данных табл. 5 получается довольно хорошее совпадение теоретических и опытных значений $k_{э\tau}$ для случая грунта с параллельной слоистостью. Расхождение между значениями $k_{ф\tau}$ объяснить можно, только тем, что опытное значение получалось при очень малых градиентах напора, а в основе теоретического расчета лежали коэффициенты, измеренные при относительно больших градиентах напора (табл. 1).

Отношение $\frac{k_{ф\tau}}{k_{фn}}$ при вычислении по теоретическим данным равно $3,7 \cdot 10^3$, по опытным данным

$$\frac{k_{ф\tau}}{k_{фn}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{4,3 \cdot 10^{-8}} = 2,6 \cdot 10^3.$$

Уменьшение этого отношения на 35% объясняется уменьшением $k_{ф\tau}$ по сравнению с тем значением, которое ожидалось по теории и связано с измерениями при очень малых градиентах напора. Если же вычислить отношение этих же коэффициентов, определенных в присутствии электрического поля, то получается та же величина¹

$$\frac{k_{ф\tau}}{k_{фn}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{4,3 \cdot 10^{-8}} = 2,6 \cdot 10^3.$$

Вывод

В грунтах, имеющих слоистую структуру, электрическое поле не изменяет величину коэффициента фильтрации, причем независимо от того, направлено ли электрическое поле перпендикулярно или параллельно относительно поверхностей раздела слоев грунта, а также совпадает ли оно или противоположно направлению гравитационного поля.

¹ Значения $k_{ф\tau}$ и $k_{ф\tau}$ получены как средние из значений $k_{ф\tau}$ (табл. 2) и $k_{ф\tau}$ (табл. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аравин В. И. Фильтрация в анизотропно-водопроницаемом грунте. Труды ЛИИ, № 1, 1940.
2. Гольдштейн М. Н. Термодинамика необратимых процессов и электроосмотический перенос в дисперсных системах. Коллоидный журнал, № 1, 1959.
3. Зиянгиров Р. С. Коэффициент электроосмоса и некоторые закономерности электроосмотической фильтрации в грунтах. Автореферат дисс., МЭИ, 1957.
4. Ломизе Г. М. и Нетушил А. В. Электроосмотическое водопонижение. Госэнергоиздат, М.-Л., 1958.
5. Нетушил А. В. Расчет и моделирование электрофильтрации в анизотропных средах. Труды МЭИ, вып. XIV. Госэнергоиздат, М.-Л., 1953.
6. Мухин А. А. Некоторые вопросы теории и практики электроосмотического водопонижения. Автореферат дисс., МЭИ, 1954.
7. Федоров Б. С. Водопроницаемость глинистых грунтов в электрическом поле. Гос. ин-т «Спецстройпроект», Информационный бюлл., № 2, М., 1957.
8. Юдовина С. А. О влиянии электрического поля на фильтрационные свойства пористой среды. Труды ЛГМИ, № 9, 1960.
9. Юдовина С. А. О взаимодействии гравитационной и электроосмотической фильтрации воды в пористой среде. Труды ЛГМИ, № 11, 1962.
10. Dachler R. Über Sickerwasserströmungen in geschichtetem Material. Die Wasserwirtschaft, № 2, 1933.

П. П. АНГЕЛОПУЛО

СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ЗАТОРООБРАЗОВАНИЯ

Если выделить из общей гидрологии и гидрофизики ледоведение как самостоятельную науку, предметом которой является изучение физических свойств, закономерностей образования, роста, движения и исчезновения льда на естественных и искусственных водоемах, а также вопросов ледового режима, инженерной ледотехники и прогнозов ледовых явлений, то, как и во всякой другой науке, в ледоведении можно обнаружить разделы, совершенно несравнимые по степени изученности.

Тогда как ледовый режим водоемов, общезфизические свойства льда изучены и описаны достаточно подробно, такие области ледоведения, как проблема донного льда и в особенности вопросы образования заторов являются до настоящего времени наиболее слабоосвещенными и в значительной мере спорными.

Как известно, проблема донного льда, начиная от первых работ Плота и Хэлса в первой половине XVIII в. и до наших дней, несмотря на неирекращающийся интерес и большое количество исследований, до сих пор не имеет окончательного и бесспорного решения. В еще худшем состоянии находится изученность заторов льда — наименее освещенный в литературе вопрос ледоведения. Поскольку специальные работы, посвященные заторам льда, насчитываются лишь единицами, а в остальных частично в большей или меньшей степени отражаются те или иные черты процессов заторообразования, при обзоре литературы в данном случае оказывается более целесообразным отступить от общепринятого хронологического порядка и рассматривать литературу по основным направлениям изучения заторных явлений. Таких основных направлений семь:

1) общегидрологические и географические описания (описательное направление);

2) работы, связывающие заторные явления с режимом водоема (режимное направление);

3) работы, рассматривающие физическую сторону процесса (физическое направление);

4) работы, рассматривающие воздействие заторов льда на гидротехнические сооружения (гидротехническое направление);

5) работы методического характера (методическое направление);

6) прогностическое направление.

7) работы, посвященные борьбе с заторами.

В случае, если работа одного автора затрагивает различные направления, в дальнейшем она будет рассматриваться соответственно в различных разделах.

Описательное направление

Географическим и общегидрологическим описаниям заторов льда посвящено подавляющее большинство работ по данному вопросу. Как направление, наиболее доступное, с которого всегда начинается изучение любого явления или процесса, описательное направление в литературе открывает историю данного вопроса и до настоящего времени занимает более половины объема даже в специальных работах.

Начало изучения заторных явлений относится ко второй половине XIX в. К числу первых относится работа Г. Третьякова [78], обратившего внимание на заторные явления, связавшего образование заторов с отмелями, перекатами и островами и отметившего вредные последствия заторов для рыбного хозяйства.

М. А. Великанов [29] описал заторные явления на р. Енисее, привел величины заторных подъемов уровня (до 13 м за сутки) и дал примеры вредного воздействия заторов для речного транспорта.

В 1912 г. С. А. Васильев [31] отметил большую мощность заторов льда, разрушение ими берегов и островов.

Е. В. Близняк [14] при обследовании р. Енисея отмечает большое количество мощных заторов во время весеннего ледохода, связывает наводнения у г. Енисейска с заторными явлениями, выявляет зависимость интенсивности заторообразования с направлением течения рек.

Д. А. Богдановым [17] намечается общая схема заторообразования, причем автор связывает мощность заторов с метеорологическими факторами, в частности, с интенсивностью снеготаяния.

Е. И. Иогансон [43], описывая режим р. Волхова, рассматривает также заторные явления и приводит первое определение затора.

А. А. Труфанов [80] описывает заторы льда и указывает, что причиной их образования являются силы трения, возникающие как между самими льдинами, так и между льдом и берегами.

Ф. И. Быдин во многих своих работах касается вопросов образования заторов на различных реках уже Европейской территории (Волге, Свири, Западной Двине и др.) [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Ф. И. Быдин дает наиболее полное определение заторов и приводит самые подробные и четкие описания, анализирует причины заторообразования.

П. П. Стакле [86] в 1932 г., рассматривая зимний режим латвийских рек, касается вопросов образования заторов, описывает заторы на р. Даугаве и связывает их образование с характером продольного профиля, неравномерностью распределения льда по длине реки, изменениями морфометрических характеристик и с влиянием осенне-зимних зажорных скоплений шуги.

К тому же периоду относится весьма тщательное и подробное описание ледяных нагромождений, наблюдаемых на прибалтийских реках, составленное Е. Краус [85]. Описание хорошо иллюстрировано очень удачными photographиями и содержит указания на связь заторных нагромождений льда с рельефом дна водотоков.

Подробные описания заторных явлений на р. Енисее имеются в работе И. Я. Лисера [50]. Кроме описаний заторов, автор отмечает влияние на них толщины льда, делает попытку оценки мощности затора по максимальному заторному уровню, анализирует влияние морфологии русла и продольного уклона, отмечает, что наиболее мощные заторы наблюдаются при уже вскрывшемся нижнем плесе, хотя и не дает объяснения этому явлению.

Описания заторных явлений на различных реках приводятся также в работах Федорова [79], Жила [41], Нечай [57] и Пасторса [59, 60].

Режимное направление

Направление, связывающее заторные явления с режимом водоема, в большинстве работ настолько тесно соприкасается с описанием заторов, что порой их бывает весьма трудно дифференцировать. Так, в работах Ф. И. Быдина [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] режимные вопросы ледохода и заторов льда тесно переплетены с описаниями этих процессов. Наиболее подробно освещается влияние заторов на режим реки в материалах по изучению пропуска ледохода через гидротехнические сооружения Кегумской ГЭС на р. Даугаве. Автор приводит подробные результаты наблюдений над изменениями уровней воды и расходов в период заторообразования, анализирует особенности подвижек и прорыва заторов, впервые дает объяснение резкого подъема уровней и роста расходов у плотины при прорыве затора в верхнем бьефе, связывая это явление с «поршневым» действием сдвинувшегося затора.

Работой чисто режимного характера является труд Б. П. Панова [61], в котором целый раздел посвящен заторам льда. Основные положения этого раздела следующие:

1. Дается определение затора как временного, задерживающегося «на каком-либо участке реки в период ледохода скопления ледового материала, вызывающего подъема уровней».

2. Предлагаются количественные критерии, позволяющие отличать осенние заторы от зажоров.

3. Высказывается предположение, что на участках с пологими берегами при повышении ледоходных уровней вероятность заторов уменьшается вследствие увеличения ширины реки.

4. Приводится классификация заторов по режимным признакам.

5. Отмечается положительная сторона действия заторов при закрытых нижних плесах для ниже лежащих участков.

6. Приводится анализ связей режимных характеристик при различного типа заторах.

В работе Л. И. Глазачевой [34] освещены повторяемость и распределение заторов льда на реках Латвийской ССР, выявлены некоторые связи мощности заторов с уровнями весеннего половодья и объемами сплавного льда.

Физическое направление

Специальных работ, посвященных целиком изучению физической стороны процессов заторообразования, почти нет. Имеются лишь отдельные попытки выявить наиболее общие закономерности чисто механического характера.

И. М. Коновалов, П. Н. Орлов и К. С. Емельянов [46] связывают образование заторов с нарушением условий неразрывности ледохода. Затвор льда образуется в том случае, если расход льда по длине реки уменьшается за счет аккумуляции льда в стесненном сечении. Сравнивая гидравлические характеристики подходного и заторного створов, Коновалов, Орлов, Емельянов принимают

$$\alpha_1 B_1 n_1 v_1 = \alpha_2 B_2 n_2 v_2, \quad (1)$$

где v_1 — скорость льда на участке подхода;

v_2 — скорость льда в заторном сечении;

B_1 — ширина реки на участке подхода;

B_2 — ширина реки в заторном сечении;

n_1 ; n_2 — число слоев льда;

α — коэффициент густоты ледохода.

В результате они проходят к выводу, что при $\alpha_1 = 0,9$, $B_1 = 5 B_2$, $v_1 = 3 v_2$, $n_1 = 1$ лед может быть пропущен через заторное сечение только в 13,5 слоев, что неизбежно приведет к затору. В этой же работе [46] процессы разрушения заторов связываются с достижением «силы давления накопившейся массы льда и воды на ледяную плотину» такого критического значения, когда эта сила превышает силы взаимного сцепления льдин в заторе. В работе М. К. Федорова [79] в основном приводятся те же результаты. Обнаружив некоторую аналогию в общих чертах процессов образования заторов льда и заломов леса, причем аналогию чисто внешнюю (скопление транспортируемой массы и возникновение временного подпора), Федоров утверждает, что «при нарушении центра сжатия, замка, остальная часть ледяной плотины быстро разрушается под гидростатическим давлением масс воды, скопившихся выше нагромождения льда». Такое утверждение недостаточно убедительно, так как и геометрическая форма и физические свойства сплавляемых бревен ни в чем не имеют сходства с льдинами, кроме достаточной плавучести. Упаковка льдин в заторе всегда значительно более плотная, лед обладает свойствами режеляции, размеры льдин в заторе изменяются в самом широком диапазоне — от шугообразных частиц до крупных ледяных полей. Кроме того, льдины относительно легко деформируются, изменяют свои размеры и форму, а также и структуру, чего никак нельзя сказать о сплавляемом по реке лесу. Удаленное из залома отдельное звено, как правило, не может быть замещено соседними ввиду сложного переплетения бревен и их взаимного сцепления, тогда как в заторе удаленные искусственно массы льда немедленно замещаются соседними, что наглядно можно видеть при взрывных работах.

Вообще, поиски внешнего сходства в различных процессах — весьма ответственное дело, к которому следует подходить с особой осторожностью. «При этом не должно быть упущено из внимания, что исследовательская работа, связанная с той или иной схематизацией явления, требует большой осторожности, чтобы не экстраполировать схематизированную трактовку, соответствующую определенным условиям опыта, на явления, находящиеся в сходных, но не тождественных условиях» (В. Е. Тимонов [74]).

Работ, посвященных физике заторов льда, мало. Следует остановиться на работе Ю. А. Деева [35], основные положения которой сводятся к следующему.

1. Затор возникает при условии:

- а) наличия ледохода,
- б) недостаточной пропускной способности русла,
- в) последовательного уменьшения Q_n (максимально возможного для данного участка расхода льда) вниз по течению реки.

2. Возможность возникновения затора при ледоходе заданной повторяемости Π (по количеству льда и размерам льдин) оценивается

критерием $K = 1 - \frac{Q_n}{\Pi}$, согласно которому затор возникает только при $K > 0$.

3. Первые льдины, остановившиеся в верхней части заторного участка, будут проталкиваться внутрь его за счет энергии E льдин, подплывающих к затору, при соблюдении условий $A_{\text{деф}} < E < A_{\text{прот}}$ и $A_{\text{прот}} < A_{\text{нагр}}$, где $A_{\text{деф}}$; $A_{\text{нагр}}$; $A_{\text{прот}}$ — работа сил, необходимая для разрушения подплывающих льдин, нагромождения их и проталкивания внутрь участка.

4. С ростом длины слоя проталкиваемых льдин увеличивается $A_{\text{прот}}$, что может привести к неравенству $E < A_{\text{прот}}$, и образование затора прекратится.

5. В дальнейшем при $A_{\text{прот}} > E > A_{\text{нагр}}$ подплывающие льдины не проталкиваются, а нагромождаются друг на друга.

6. Основная причина нагромождений льда — вращающий момент от внецентренных ударов, что связано с неравномерностью толщины льда.

7. Начальная скорость, обеспечивающая процесс нагромождения, определяется из дифференциального уравнения движения льдины и вычисляется по формуле

$$v_0 = 0,063 \left[\sigma \frac{h_0}{Kl^2} (h + 2K - 2) \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где σ — предел прочности льда на сжатие;

h_0 ; h — средняя и наибольшая толщина льда;

l — длина льдины.

Для полной заброски надвигаемой льдины на ударяемую необходима скорость

$$v_0 = 3,3 \left[h_0 \left(4\sigma \frac{h}{10^4} l^2 + 1 \right) \right]^{0,5}. \quad (3)$$

Скорость движения льдины пропорциональна поверхностной скорости потока, и при $v \geq v_{\text{кр}}$ подплывающие льдины будут нагромождаться друг на друга, если $Q_{\text{л}} < \Pi$.

8. По мере формирования хвоста затора кривая подпора с минимальными уклонами как бы отодвигается от ядра, и на всем участке уклон возрастает. Соответственно растет и статическое давление тыловой части на ядро. Когда «это давление превысит работу A , необходимую для сцепления льдин в заторе $P_{\text{ст}} > A$, начинается уплотнение льда в теле затора». В выводах, полученных Деевым, имеется ряд спорных положений, которые необходимо осветить несколько подробнее.

1. Автор сопоставляет несравнимые величины, принимая за критерий возможности заторообразования отношение максимально возможного расхода льда к ледоходу заданной повторяемости. По-видимому, под величиной Π следует понимать величину расхода льда заданной повторяемости. В таком случае критерий несколько усложнен, так как то же условие можно выразить неравенством:

2. Энергия вращения подплывающих льдин несоизмерима по величине с работой, необходимой для нагромождения льда в заторе, что не подтверждает доминирующей роли вращающего момента от внецентренных ударов подплывающих льдин в создании нагромождений льда.

3. Автор сопоставляет давление тыловой части затора с работой сил сцепления льдин. Сопоставление давления (размерность $\text{кг}/\text{см}^2$ с работой (размерность $\text{кг} \cdot \text{м}$) физически лишено смысла. Физически оправ-

данной может быть попытка сравнения работы сил давления с энергией, затраченной на преодоление сил сцепления льда в заторе.

4. Нагромождение и торошение льда в заторе возникает не столько за счет ударов льдин, кинетическая энергия которых, по мере подхода к затору уменьшается, сколько за счет давления хвостовой части на ядро. На практике в хвостовой части затора, воспринимающей непосредственно удары льдин, торошение и нагромождение льда незначительно и возрастает от хвоста к голове. Если бы основной причиной торошения были удары льдин, мы наблюдали бы обратную картину — уменьшение нагромождений в головной части затора и увеличение в хвостовой.

5. Формулы начальных скоростей, обеспечивающих процесс надвиги льдин v_0 , и полной заброски v_{0_2} , вызывают сомнение, так как не дают размерности скоростей.

Ю. А. Деев [36], рассматривая ледоход как единую материальную систему и используя частично уравнения динамики для определения максимально возможного при данных условиях расхода льда, получает уравнение

$$Q_{\lambda} = hB_0 \left[\psi \sqrt{\frac{2A + Mv_0^2}{M}} \right]_m, \quad (4)$$

где A — работа всех сил, действующих на систему;

h — толщина льда;

B_0 — ширина потока;

M — масса льда в системе;

ψ — объемный коэффициент ледохода;

v_0 — скорость движения льда на входном створе;

m — индекс, обозначающий, что принимается максимальное значение выражения в скобках.

Недостаточно правомерное распространение уравнения динамики материальной точки на материальную систему приводит Деева к ряду противоречий:

а) рассматриваемая скорость движения льда как функция объемного коэффициента ледохода заменяется выражением $\sqrt{\frac{2A + Mv_0^2}{M}}$,

что уже не соответствует действительности, так как A — работа действующих на систему внешних сил. При таком подходе силы трения между льдинами и взаимные столкновения льдин выпадают из уравнения и в дальнейших преобразованиях не учитываются. Уравнение справедливо только для одного сечения из всей полосы ледохода, именно того сечения, где в данный момент расположен центр масс системы;

б) отыскание максимума функции $y = Y \left[\psi \sqrt{\frac{2A + Mv_0^2}{M}} \right]_m$, рекомендуемое Деевым, в настоящее время представляет собой практически неразрешимую задачу, так как неизвестен сам вид зависимости действующих сил от коэффициента густоты ледохода.

В. П. Берденников [7, 8, 9] подходит к представлению о физической основе заторных процессов с позиции учета баланса ледового материала, исходя из следующего уравнения:

$$W_{\text{общ}} - W_{\text{зат}} - W_{\text{подл}} = 0, \quad (5)$$

где $W_{\text{общ}}$ — количество поступающего сверху льда;

$W_{\text{зат}}$ — количество льда, идущего на образование затора;

$W_{\text{подл}}$ — количество льда, переносимого под затором.

В этих работах Берденников предлагает использовать критерий $\frac{\Omega_1}{\Omega_2}$, характеризующий степень стеснения русла, где Ω_1 — площадь водного сечения без затора, Ω_2 — площадь того же сечения при заторе при том же расходе воды.

В других работах по заторам льда [10, 11, 12] Берденников приводит уравнение равновесия сил, определяющее в общем виде взаимодействие потока, ледяного покрова и воздушных масс,

$$F_a + P_m + P_v + P_i + F_v - T_{тр} - P_\sigma = 0, \quad (6)$$

где F_a — сила трения воздушных масс;

P_m — сила давления на кромку льда сверху;

P_v — суммарное гидродинамическое давление на лобовую кромку затора;

P_i — составляющая веса в направлении водной поверхности;

F_v — сила трения льда по воде;

$T_{тр}$ — сила трения льда по берегам;

P_σ — нормальная составляющая напряжения льда.

Далее Берденников определяет усилия, действующие вдоль оси потока и в поперечном направлении, и выводит уравнение равновесия действующих сил в виде

$$(p_x + dp_x) Bh - p_x Bh - \tau_x B dx + 2\xi h p_x dx = 0, \quad (7)$$

где ξ — коэффициент бокового давления;

B — ширина потока;

h — толщина льда;

p_x — единичное давление вдоль оси потока.

Заслуживает внимания предложенная Берденниковым аналогия между давлением в заторе и «плоским давлением» сыпучих тел, хотя против этой аналогии имеются некоторые возражения, формула:

$$\tau_m \leq R + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

где τ_m — критическое касательное напряжение;

R — параметр, характеризующий межчастичное сцепление в сыпучих телах;

σ_n — нормальное напряжение;

φ — угол внутреннего трения.

В сущности, (8) является формулой двучленного закона трения.

В применении к сыпучим телам R имеет существенное значение, тогда как в условиях раздробленного состояния ледяного покрова, крупных размеров льдин и малых коэффициентов взаимного касания, для ледохода и заторов величиной молекулярного сцепления можно пренебречь и считать трение, подчиняющимся закону Амонтона.

В. П. Берденников [13] первый попытался районировать заторные явления по принципу выделения основных местных факторов — орографии, морфометрии, направления течения и искусственного регулирования стока. Он привел схемы расчетов давления заторных масс на

гидротехнические сооружения, определил составляющие усилия затор-
ных масс, дал зависимость толщины затора от превышения заторного
уровня в виде

$$\frac{\Delta H}{h^*} = \frac{\Delta H_{\max}}{h}, \quad (9)$$

где ΔH — превышение уровня, вызываемое затором;

h^* — толщина затора в конкретном году;

$\Delta H_{\max}$ — максимальное превышение уровня;

h — максимальная толщина затора.

Канадские исследователи Б. Мишель, Паризе, Кивисильд [37] в ре-
зультате наблюдений на реках (Святого Лаврентия и др.) получили
приближенную формулу критической скорости, необходимой для устой-
чивости подплывающих к затору льдин,

$$v_{\text{кр}} = k_{\phi} \sqrt{2gh \frac{\gamma - \gamma_1}{\gamma}}; \quad (10)$$

где k_{ϕ} — коэффициент формулы;

h — толщина льда;

γ ; γ_1 — удельный вес воды и льда;

v — скорость потока под льдиной.

При $v \leq v_{\text{кр}}$ льдины останавливаются у перемычки.

При $v > v_{\text{кр}}$ подплывающие льдины, ударяясь о преграду, перево-
рачиваются, подныривают и уходят под перемычку.

Если скорость потока больше критического значения, весь лед будет
увлекаться под преграду и откладываться под ледяным покровом в ме-
стах, где сдвигающее усилие уравнивается силами трения, вызы-
вая рост затора в глубину. Такое представление о росте затора более
реально, чем представление о расчете за счет нагромождения льда
сверху, так как подтверждается натурными и экспериментальными ра-
ботами как канадских исследователей, так и опытами Г. С. Шадрина
(ВНИИГ).

В работах Б. Мишель [87, 88, 89, 90] рассматриваются вопросы
давления раздробленного ледяного поля на сооружения, удара отдель-
ных льдин о препятствие, условия равновесия кромки ледяного поля
и равновесия затора. Последнее уравнение приводится в виде

$$(h' - t')^3 t'^2 - h' (1 - 2\varepsilon) = 0. \quad (11)$$

$$\text{Здесь } h' = \frac{h \sqrt[4]{B}}{\mu \sqrt{Q}}; \quad \varepsilon = 0,4; \quad t' = \frac{t \sqrt[4]{B}}{\mu \sqrt{Q}},$$

где

$$\mu = \sqrt[4]{g\rho \frac{f}{8} \sin(1 - \varepsilon) \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) (\gamma - \gamma_1)},$$

f — коэффициент Дарси;

φ — угол внутреннего трения.

Гидротехническое направление

С гидротехнической точки зрения, основным является вопрос о воздействии льда на различные инженерные сооружения. Поскольку заторный лед, как и всякий лед, находящийся в водоеме, может оказывать два вида взаимодействия — статическое и динамическое давление, то в первую очередь необходимо остановиться на работах Б. В. Проскурякова и К. Н. Коржавина, наиболее полно осветивших эти вопросы.

Б. В. Проскуряков [67], исследуя процесс воздействия ледяного покрова на сооружения большой протяженности при изменении температуры, обнаружил существенные недостатки в выводах Ройена и разработал метод расчета статического давления льда.

Учитывая текучесть льда при сжатии, когда напряжения превышают предел упругости, и действительный характер изменения средней температуры льда по высоте, Проскуряков приходит к следующим выводам:

- а) деформации льда осуществляются в вертикальном направлении (при наличии жестких берегов);
- б) лед в области пластических деформаций имеет сходство с вязкой жидкостью;
- в) постоянство температуры и напряжений в выводах Ройена не соответствует действительному характеру процесса;
- г) дифференцируя уравнение

$$\varepsilon = \frac{cp_c \sqrt[3]{\tau}}{t_{cp}^{\circ} + 1}, \quad (12)$$

где ε — относительное сжатие льда;

τ — время;

t_{cp}° — средняя температура;

p_c — нагрузка,

и принимая во внимание линейный характер изменений температуры льда во времени, после преобразований получена величина статического давления

$$P_0 = \frac{t_n^{\circ} - B\tau + 1}{B\tau^{\frac{1}{2}}} v + \frac{\alpha B}{c} (t_n^{\circ} - B\tau + 1) \tau^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

и величина максимального давления

$$P_{\max} = 0,3 (t_n^{\circ} + 1) \sqrt[3]{B(t_n^{\circ} + 1)^2}. \quad (14)$$

Полное давление равно

$$P_c = \int_0^h \sigma dz = \int_0^h \left[4\alpha (a + b\tau + c\tau^2) \frac{\partial t^{\circ}}{\partial \tau} + \sigma_0 \right] dz. \quad (15)$$

Хотя Проскуряков заторы льда специально не рассматривал, отдельные положения его работы, его теория и схема решения задачи могут и должны быть использованы при расчете воздействия заторов на гидротехнические сооружения, при расчетах давления льда в предледоходный период и в других вопросах ледотехники.

Вопросы динамического и статического давления льда на сооружения освещены в работах Н. Н. Петруничева [64], дополнившего отдельные положения о статическом давлении и проанализировавшего существующие расчетные формулы динамического давления льда.

К. Н. Коржавин [47] также не задавался целью непосредственного изучения заторов, но исследовал и разработал методику определения динамического давления льда, процессы взаимодействия льдин с опорами и вопросы пропуска ледохода через гидротехнические сооружения. Основные выводы таковы.

1. Давление льда, возникающее при прорезании опорой ледяного поля, можно определить по зависимости

$$p = k_p b_0 h, \quad (16)$$

где b_0 — ширина опоры;

h — толщина льда;

$$k_p = \frac{2,5 R_{сж} m k}{\sqrt[3]{v}}.$$

2. Давление льда при остановке ледяного поля у опоры определяется по формуле

$$p = 0,68 v h \sqrt{2 R_{сж} m \operatorname{tg} \alpha}. \quad (17)$$

3. Предложен кинематический метод определения динамического давления льда, использующий скорость, размеры и шероховатость льдин, скорость течения и время, затраченное на прорезание льдины опорой.

4. Предложен метод определения минимально допустимой величины пролета моста, необходимой для беззаторного пропуска ледохода, основанный на кинетической энергии льда, передаваемой на опору.

Г. С. Шадрин исследовал ледовый режим некоторых крупных водохранилищ и условия образования заторов в зонах выклинивания подпора. В этих исследованиях впервые были применены лабораторно-экспериментальные методы изучения заторов при помощи моделей льдин — деревянных и парафиновых пластинок. В результате были выявлены некоторые качественные особенности заторообразования:

а) деревянные модели образуют однослойные скопления пластин, расположенных под углом к горизонту и прилегающих друг к другу основаниями;

б) при использовании моделей льдин в лотке перед поверхностной преградой образовать многослойный затор не удалось — пластинки подныривали и перекатывались под нижней поверхностью однослойного затора;

в) в зоне выклинивания и при снижении скоростей подхода перед перегородкой образовывался первичный однослойный затор;

г) рост затора можно разделить на два процесса — формирование и рост ядра (головной части) и рост периферийной части — хвоста затора;

д) поднырнувшие под затор пластинки частично проносятся под затором, перекатываясь по нижней его поверхности, частично откладываются под ней, вначале располагаясь горизонтально. Последующие, накапливающиеся под затором пластинки располагаются уже не горизонтально, а под более или менее острым углом, в сторону, противоположную направлению потока. Таким образом возникает многослойное ядро или головная часть затора;

е) при уменьшении поверхностных скоростей потока рост затора происходит преимущественно в длину, т. е. затор остается почти однослойным, а подплывающие льдины, останавливаясь перед преградой, образуют периферийную часть или «хвост» затора.

Стандартные размеры, правильная геометрическая форма моделей льдин, несоблюдение масштабов подобия в отношении размеров льдин, различие в физических свойствах льда, дерева и парафина позволили наметить лишь приблизительное, общее и только качественное представление о процессах роста затора. В естественных условиях несомненно наблюдаются значительные отклонения от данных экспериментов.

Ф. И. Быдин дал объяснение интенсивных подъемов уровня и роста расходов при подвижке заторов в верхнем бьефе водохранилищ, основанное на анализе и расчете «поршневого» эффекта сдвинувшегося затора.

А. М. Естифеев [39] описал и проанализировал конкретные случаи воздействия льда на гидротехнические сооружения (Волховская ГЭС), предложил метод расчета беззаторного транзита шуги в каналах.

С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель и К. И. Россинский [48] выполнили работу ледотермического направления, хотя и не связанную непосредственно с проблемами заторов льда, но дающую возможность распространить приводимые положения на некоторые вопросы образования заторов.

Отдельные положения А. Г. Колесникова [45], касающиеся термики водоемов и условий развития ледовых образований, должны быть также учтены при изучении заторных процессов.

Прогностическое направление

Наиболее важным для прогнозирования элементом при образовании заторов льда является высота максимального заторного уровня. В этом направлении основным является исследование Л. Г. Шуляковского [82, 83], который анализирует процесс заторообразования, формирования максимального заторного уровня и предлагает методику его прогнозирования, основанную на следующих положениях.

1. Морфология русла является одним из основных факторов заторообразования.

2. Заторы образуются в зонах выклинивания подпора или уменьшения продольного уклона на незарегулированных реках.

3. При вскрытии реки снизу вверх возможность образования затора минимальна.

4. Наиболее мощные заторы образуются у кромки нетронутого ледяного покрова при закрытом нижнем плесе.

5. Основная причина образования заторов в зоне выклинивания подпора — уменьшение скоростей течения и связанное с этим увеличение толщины льда в период ледостава.

А. Г. Шуляковский предложил метод прогнозирования превышения максимального заторного уровня, согласно которому

$$\Delta H = f \left[\frac{\Delta H_{н.з}}{\tau}; h_{сн}; \Sigma - t^{\circ}; \frac{\Sigma - t_n^{\circ}}{\Sigma + t_r^{\circ}}; t_{ср \text{ сут min}}^{\circ} \right], \quad (18)$$

где $\Sigma - t^{\circ}$ — сумма отрицательных температур воздуха;

$\Sigma + t^{\circ}$ — сумма положительных температур воздуха;

$h_{\text{сн}}$ — высота снежного покрова;

$\frac{\Delta H}{\tau}$ — интенсивность нарастания паводка;

$t_{\text{ср сут min}}$ — наименьшая среднесуточная температура воздуха за период похолодания.

Основное затруднение предлагаемой методики при практическом ее использовании заключается в относительно малой заблаговременности прогноза: некоторые необходимые данные можно получить лишь непосредственно перед вскрытием реки и началом образования затора. Интересы же народного хозяйства требуют прогноза значительно большей заблаговременности.

В работах А. А. Пасторса [59, 60], посвященных описанию заторных явлений на реках Латвии и их прогнозированию (в ущерб чисто прогностическим задачам), основное внимание уделяется описанию заторов на различных участках, относительно сходных между собой и повторяющихся в общих чертах. Сама же методика прогноза представляет собой принцип, изложенный и разработанный ранее Л. Г. Шуляковским, только излишне усложненный и приведенный в менее удобной для практического применения форме.

В. В. Пиотрович [65] выполнил работу по анализу условий образования и разрушения ледяного покрова на озерах-водохранилищах и получил богатый материал для разработки прогнозов ледовых явлений, непосредственно связанных с заторными процессами.

Методическое направление

Работ методического характера очень мало [38, 56, 69, 74—77].

В. Е. Тимонов [74—77], неоднократно во многих своих работах ставивший вопрос о необходимости создания специальных ледоисследовательских учреждений и лабораторий, о необходимости более детального и тщательного изучения ледового режима, разработал общую методику изучения ледовых процессов.

А. М. Естифеев [38] классифицировал основные ледовые процессы по характерным типам и связал их с главными факторами — скоростью течения, температурой, ветром, морфологией русла и расходами воды. На основании установленных основных типов им предложена методика анализа многочисленных конкретных ледовых образований и комплексов и выявления закономерности их развития. Предложенная методика позволяет, выделив главные факторы, определить тип процесса и в дальнейшем предусмотреть его ход развития, а также необходимые меры по борьбе с возможными затруднениями.

В. А. Рымша [69] считает, что наблюдения над заторами должны включать следующие работы:

- а) маршрутные обследования реки в районе образования затора;
- б) наблюдения над вскрытием реки;
- в) уровенные наблюдения;
- г) измерения расходов льда;
- д) метеорологические наблюдения;
- е) специальные наблюдения (авиаразведка, фотосъемка).

Р. А. Нежиговский [56], составивший специальную инструкцию для Гидрометеорологической службы, приводит более расширенную программу наблюдений над заторными явлениями, в основных чертах сходную с рекомендацией В. А. Рымша.

Работы, посвященные борьбе с заторами льда

Наиболее подробными исследованиями и обобщениями в области борьбы с вредными воздействиями заторов занимались Ф. И. Быдин, А. М. Естифеев, Х. Барнес, Н. В. Матанцев, И. М. Коновалов, М. В. Мясников, И. С. Песчанский, В. П. Захаров, О. П. Чижев, В. М. Тавризлов.

В. С. Антонов [1], изучавший ледовый режим сибирских рек (Енисей, Обь, Лены), выявил влияние весенних заторов на режим этих рек и особенно на сроки и характер вскрытия. По данным Антонова, заторы льда на указанных реках не только не наносят ущерба народному хозяйству, но даже оказывают благотворное влияние как на процессы очищения реки ото льда, так и на условия навигации, способствуя продлению сроков навигации и улучшению навигационных условий на перекатах. Отмечается также определенная польза заторов в смысле обводнения и удобрения пойменных сельскохозяйственных угодий при аккумуляции льда на пойменных участках. Однако, учитывая, что все вышеперечисленные положительные стороны заторных явлений, относящиеся преимущественно к северным и сибирским рекам, протекающим в районах с чрезвычайно малой плотностью населения и мало развитых в промышленном отношении, общий баланс пользы и ущерба от заторов складывается явно не в пользу заторных явлений.

Ф. И. Быдин [20] обобщил опыт зарубежных исследований по борьбе с ледовыми затруднениями при гидротехнических сооружениях. В его работе основное внимание уделено методам борьбы с динамическим и статическим давлением льда, борьбе с обмерзанием гидротехнических сооружений и закупоркой их шугой. Частично рассмотрены методы борьбы с заторами льда путем взрывных работ и применения ледоколов.

В результате изучения заторов на р. Западной Двине Быдин дает практические рекомендации по пропуску ледохода через сооружения Кегумской ГЭС, используемые в настоящее время и на каскаде Даугавских ГЭС. Необходимо отметить, что укоренившееся в практике применение взрывных работ для борьбы с заторами недостаточно эффективно, что неоднократно подтверждается Ф. И. Быдиным [28], наблюдавшим результаты взрывных работ на различных водных объектах.

Попытки упорядочения взрывных работ нашли отражение в работах Ф. И. Быдина, а затем Н. В. Матанцева [19, 54], рекомендовавших производить взрывы при таком расположении лунок, чтобы при нажиме двинувшегося льда ледяной покров на затороопасном участке скалывался по линии лунок полосой, параллельной оси потока и ледяные поля скользили по кромке разрушенного взрывами льда. Целесообразность применения такого метода по сравнению с бессистемными взрывами подтверждают И. М. Коновалов, П. Н. Орлов и К. С. Емельянов [46].

Применяющееся в настоящее время разрушение ледяных полей ледоколами перед началом ледохода, описанное Барнесом и Коноваловым, получило довольно широкое распространение, но оценка этого метода весьма приближена и не дает возможности судить о его эффективности.

Что касается настоятельно рекомендуемого Барнесом [5] применения термитных бомб, дающих замедленный взрыв, то целесообразность их применения практически проверялась неоднократно различными исследователями и была единодушно отвергнута, как не оправдавшая себя.

Метод опыления поверхности льда красящими и химически активными веществами исследован в работах И. С. Песчанского [62, 63], И. М. Коновалова, [46], М. В. Мясникова [55], а также и в работах зарубежных авторов [70] и в отдельных случаях может быть применим как подсобное средство, но решающего значения этот метод пока не имеет.

В. М. Тавризов [73] разработал руководство для производителей взрывных работ, содержащее основные данные по ледовому режиму рек, способам борьбы со льдом и в основном подробные инструкции по взрывным работам на льду.

Рассмотрев и кратко проанализировав относительно немногочисленную литературу по вопросам заторообразования, можно сделать следующие выводы.

1. Степень изученности данного вопроса по сравнению с другими разделами гидрологии, гидрофизики и гидротехники относительно невелика.

2. Наиболее широко освещена в литературе качественная сторона процесса в смысле географических и общегидрологических описаний.

3. Состояние изученности физической стороны явлений крайне неудовлетворительно. Серьезных исследований по этому вопросу со стороны гидрофизиков и гидротехников очень мало, а имеющиеся попытки вскрыть физические особенности заторообразования с привлечением физико-математического аппарата не удачны.

4. Недостаточность знаний в области физики процесса отрицательно сказывается и на практическом приложении в гидротехнике.

5. Разработка методики прогнозирования заторов находится в состоянии, не позволяющем практически прогнозировать это явление.

6. Существующие методы борьбы с заторами мало эффективны, а более надежных способов пока нет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов В. С. Влияние речного стока на ледяной покров арктических водоемов. Тр. НИИ, Л., 1965.
2. Антипин В. А., Карабаш Д. Т. Подрывные работы при ледоходе. Трансжелдориздат, М., 1944.
3. Ангелопуло П. П. Динамика заторов льда на р. Зап. Двине в районе г. Яунелгава. Сб. работ Рижской ГМО, вып. 6, Рига, 1964.
4. Ангелопуло П. П. О некоторых особенностях заторообразования. Сб. работ Рижской ГМО, вып. 7, Рига, 1965.
5. Барнес Х. Ледотехника. Гостехиздат, М.-Л., 1934.
6. Берг В. А. О гидродинамических условиях ледостава и ледотранзита на водотоках. Тр. ЛГМИ, вып. 4, 1956.
7. Берденников В. П. Методика исследований зажорных явлений. Тр. ГГИ, вып. 55 (109), 1956.
8. Берденников В. П. Расчет некоторых элементов зажоров на реках Ангаре и Енисее. Тр. ГГИ, вып. 65, 1958.
9. Берденников В. П. О методике изучения формирования зажоров. Тр. III Всесоюз. съезда, т. III, 1959.
10. Берденников В. П. Методика определения напряжений ледяного покрова. Тр. ГГИ, вып. 129, 1965.
11. Берденников В. П. Физические характеристики заторов льда и зажоров. Тр. ГГИ, вып. 129, 1965.
12. Берденников В. П. Динамические условия образования заторов льда. Тр. ГГИ, вып. 110, 1964.
13. Берденников В. П. Методы давления зажорных и заторных масс льда на сооружения. Тр. ГГИ, вып. 148, 1967.
14. Близняк Е. В. Енисей от Красноярска до Енисейска. Спб., 1916.

15. Близняк Е. В. Водные исследования. Гидрометеиздат, М.-Л., 1952.
16. Бибилов Д. Н., Петруничев Н. Н. Ледовые затруднения на гидростанциях. Госэнергоиздат, М.-Л., 1950.
17. Богданов Д. А. Общая логия рек. «Речной транспорт», М., 1925.
18. Быдин Ф. И. К вопросу исследования ледоходного режима рек. Зап. ГГИ, т. 4, изд. ГГИ, Л., 1931.
19. Быдин Ф. И. Зимний режим, прогнозы и борьба со льдом на реке Свири. IV Гидрологическая конференция балтийских стран. изд. ГГИ, Л., 1933.
20. Быдин Ф. И. Ледовые затруднения и борьба с ними. Изв. ВНИИГ, вып. 8, 1932.
21. Быдин Ф. И. Зимний режим Нижней Волги. Изд. ГГИ, Л., 1935.
22. Быдин Ф. И. Затруднения и борьба с шугой на Боз-Суйской гидростанции. Изв. ВНИИГ, вып. 8, Л., 1932.
23. Быдин Ф. И. Ледоход и вызванные им осложнения. Природа, № 2, 1949.
24. Быдин Ф. И. Исследование в области прогноза по ледовому режиму. Изв. ВНИИГ, вып. 16, Л., 1935.
25. Быдин Ф. И. Вскрытие и замерзание рек. Тр. ГГИ, вып. 9, 1933.
26. Быдин Ф. И. Термический и ледовый режим рек СССР и условия его предвидения. Тр. ГГИ, вып. 19, 1939.
27. Быдин Ф. И. Развитие некоторых вопросов в области ледового режима водоемов. Тр. III Всесоюз. гидролог. съезда, т. III, 1959.
28. Быдин Ф. И. О принципах борьбы с ледоходом. Тр. ТЭИ СО АН СССР, Новосибирск, 1961.
29. Великанов М. А. Гидрология суши. Гидрометеиздат, Л., 1948.
30. Владимиров Л. Л. Новые понятия о процессе замерзания рек и образования зимних заторов льда. Спб., 1907.
31. Васильев С. А. Общие сведения о р. Лене с притоками. Спб., 1912.
32. Гвоздев В. С. Ледозадержание на малых реках с целью защиты гидротехнических сооружений. Тр. ТЭИ СО АН СССР, вып. 7, Новосибирск, 1958.
33. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
34. Глазачева Л. И. Ледовый и термический режим рек и озер Латвийской ССР. Ученые записки, геогр. науки, т. 65, Рига, 1965.
35. Деев Ю. А. О механизме образования заторов льда. Секция геогр. наук. Черновцы, 1964.
35. Деев Ю. А. О механизме образования заторов льда. Секция геогр. наук. Черновцы, 1963.
37. Гидравлические исследования. Под ред. Гунько Ф. Г. Госэнергоиздат, М.—Л., 1962.
38. Естифеев А. М. Основные ледовые процессы и ледовые комплексы. Изв. ВНИИГ, вып. 8, Л., 1932.
39. Естифеев А. М. Эксплуатационные затруднения на Волховской гидростанции в зимний период и меры, принятые для их устранения. Изв. ВНИИГ, вып. 25, Л., 1939.
40. Естифеев А. М. Опыт теории шугохода. Изв. ВНИИГ, т. 45, Л., 1951.
41. Жила И. М. Исследование заторов льда на реках Сев. Двина, Сухона и Юг в районе г. Вел. Устюг. Инф. письмо ГУГМС, № 5, М., 1962.
42. Захаров, В. П. Чижев О. П. О борьбе с ледяными заторами на реке Сыр-Дарье путем взрывных работ. Метеорология и гидрология, № 1, 1956.
43. Иогансон Е. И. Зимний режим р. Волхов и оз. Ильмень. Материалы по исследованию р. Волхов, вып. XIV, Л., 1927.
44. Карнович В. Н. Условия образования заторов льда на р. Днестре и Дубоссарском водохранилище. Тр. ГГИ, вып. 148, 1967.
45. Колесников А. Г. К вычислению температуры воды в водоеме. Ледотермические вопросы гидроэнергетики Госэнергоиздат, М., 1954.
46. Коналов И., Орлов П. Н., Емельянов К. С. Основы ледотехники речного транспорта. Речиздат, М.—Л., 1952.
47. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения. Изд. АН СССР, Новосибирск, 1962.
48. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф., Россинский К. И. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. Госэнергоиздат, М.—Л., 1947.
49. Кравченко Н. А. Формирование заторов льда на Днестре и методика их изучения. Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда, т. III, 1959.

50. Лисер Я. И. Весенние заторы льда на Енисее. Тр. ТЭИ СО АН СССР, Новосибирск, 1958.
51. Лопатин И. А. Об изборозженных и шлифованных льдом валунах и утесах по берегам Енисея. Спб., 1871.
52. Лопатин Г. В. Ледяные заторы на реке Сев. Двине. Метеорология и гидрология, № 1, 1947.
53. Лохтин В. М. Ледяной нанос и зимние заторы на р. Неве. Спб., 1906.
54. Матанцев Н. В. Скользящие ледяные поля. «Речной транспорт», № 8, 1948.
55. Мясников М. В. Опыт использования солнечной радиации для нужд речного транспорта. Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда, т. III, 1959.
56. Методические указания ГГИ, № 58. Л., 1959.
57. Нечай И. А. Изучение половодий и заторообразования в устьевой части реки Неман. Информац. письмо ГУГМС, № 5, М., 1962.
58. Нежиховский Р. А. Затор льда на реке Неве весной 1956 г. Природа, № 5, 1957.
59. Пасторс А. А. Заторы льда на реке Лиелупе. Сб. работ Рижской ГМО, вып. 6. Рига, 1964.
60. Пасторс А. А. Затор льда на р. Зап. Двине в районе Вайкуляны. Сб. работ Рижской ГМО, вып. 7. Рига, 1965.
61. Панов Б. П. Зимний режим рек СССР. Л., 1960.
62. Песчанский И. С. Ледоведение и ледотехника. Изд. Морской транспорт, М., 1963.
63. Песчанский И. С. Лед, песчинка и Солнце. Гидрометеиздат, М., 1960.
64. Петруничев Н. Н. О динамическом давлении льда на гидротехнические сооружения. Ледотермические вопросы гидроэнергетики. Госэнергоиздат, М., 1954.
65. Пиотрович В. В. Образование и стайвание льда на озерах и водохранилищах. Гидрометеиздат, М., 1958.
66. Проскуряков Б. В. К анализу дрейфа ледяных полей. Проблемы Арктики, вып. 5, 1941.
67. Проскуряков Б. В. Статическое давление льда на сооружения. Тр. ГГИ, вып. 64, 1948.
68. Проскуряков Б. В. Основные направления научных исследований в СССР в области ледотермики. Изв. ВНИИГ, вып. 78, Л., 1965.
69. Рымша В. А. Ледовые исследования на реках и водохранилищах. Гидрометеиздат, Л., 1959.
70. Реферативный журнал АН СССР «География», № 10, 1962.
71. Софер М. Г. Зависимость между пропускной способностью русла и высотой уровня воды при заторах льда. Вестник ЛГУ, № 6, вып. 1, 1967.
72. Софер М. Г. Об условиях прорыва затора на р. Малой Северной Двине в районе гор. Котласа. Изв. ВГО, вып. 3, 1967.
73. Тавризов В. М. Ледокольные взрывные работы. Изд. «Недра», М., 1967.
74. Тимонов В. Е. К вопросу о теоретических обоснованиях главнейших ледовых процессов в водоемах. Изв. ВНИИГ, вып. 14, Л., 1935.
75. Тимонов В. Е. Об организации систематического изучения ледяного покрова на наших реках и способов борьбы с вызываемыми льдом затруднениями в навигационной и береговой жизни. Спб., 1913.
76. Тимонов В. Е. Зимний режим, влияние на него гидротехнических мероприятий. 4-я Гидрологическая конференция Балтийских стран. Изд. ГГИ, Л., 1932.
77. Тимонов В. Е. О применении лабораторно-экспериментального метода ледотехнических исследований за границей по данным НИИГ. Изв. ВНИИГ, вып. 11, Л., 1934.
78. Третьяков Г. Туруханский край. Спб., 1960.
79. Федоров М. К. Заторные и зажорные явления и их развитие на реке Лене. Тр. Арктического НИИ, т. 204, 1956.
80. Труфанов А. А. Пути сплава и их эксплуатация. Речиздат, М.-Л., 1931.
81. Федосеев И. А. Развитие гидрологии суши в России. Изд. АН СССР, М., 1960.
82. Шуляковский Л. Г. О заторах льда, заторных уровнях при вскрытии рек. Метеорология и гидрология, № 7, 1951.
83. Шуляковский Л. Г., Еремينا В. И. К методике прогноза максимальных заторных уровней. Метеорология и гидрология, № 1, 1951.

84. Цинглинский М. Ф. О наблюдениях над замерзанием реки Невы и исследованиях зажоров на ней. Спб., 1905.
 85. Kraus E. Über Eisschubberge. Warszawa, 1930.
 86. Stakle P. Das hydrologische Regime der Düna (Daugawa) Warszawa, 1930.
 87. Michel B. Les ouvrages en rivière de contrôle des glaces à la débâcle. XI конгресс МАГИ, т. V, Л., 1965.
 88. Michel B., Ouellet Y. Poussee d'un champ de glaces morcellée sur un ouvrage. XI конгресс МАГИ, т. V, Л., 1965.
 89. Michel B. Critère de stabilité hydrodynamique du bord frontale d'un champ de glace. XI конгресс МАГИ, т. V, Л., 1965.
 90. Michel B. Equilibre statique d'un embâcle de débâcle. XI конгресс МАГИ, т. V, Л., 1965.
-

П. П. АНГЕЛОПУЛО

ВЛИЯНИЕ ИЗГИБА РУСЛА НА ПРОЦЕССЫ ЗАТОРООБРАЗОВАНИЯ

В достаточно обширной литературе по вопросам заторообразования на различных реках многие авторы единодушно выдвигают и поддерживают предположение о значительном влиянии изгибов русла на формирование заторов льда.

Ухудшение условий транзита льда на поворотах сомнений не вызывает, однако чрезвычайное многообразие морфометрических особенностей речных изгибов требует более детального изучения этого вопроса, выделения основных характеристик изгиба, ухудшающих транзит льда, и некоторых критериев, позволяющих оценить заторообразующее значение поворотов в конкретных случаях.

Для решения такой задачи недостаточно чисто описательного метода и частных сравнений, необходим хотя бы элементарный анализ физических условий движения потока и ледовых масс на повороте. Рассматривая возможность заторообразования на поворотах русла, необходимо выделить два типа рек и в дальнейшем изучать образование заторов на изгибе отдельно для каждого типа. Критерием в данном случае будет являться ширина реки, так как от нее будут зависеть относительные размеры льдин

$$\beta = \frac{b}{B},$$

где b — средний поперечный размер льдины,
 B — ширина реки.

Естественно предположить, что для малых рек, где поперечные размеры льдин соизмеримы с шириной потока $\beta = 0,2 \div 0,5$ условия образования первичной перемычки значительно упрощаются и одновременно это явление теряет закономерность и приобретает чисто случайный характер. В некоторых случаях оказывается достаточным взаимодействия двух-трех крупных льдин, чтобы создать перемычку. С другой стороны, на крупных реках, где относительные размеры льдин

$\beta = \frac{1}{20} \div \frac{1}{40}$, вероятность образования случайной перемычки достаточно мала и может приниматься в расчет только при пропусках ледохода в пролетах мостов или через рукава. Для крупных рек процесс заторообразования на поворотах носит более закономерный характер.

Принимая при относительно малых размерах льдин ледовые массы на прямолинейном участке подхода за равномерно распределенные по ширине потока плавающие тела небольших размеров, в соответствии с механизмом движения потока на изгибе будем иметь:

1) отклонение льдин на изгибе к внешнему, вогнутому берегу и сужение первоначальной полосы ледохода;

2) столкновения льдин и стеснение льда в результате разности поверхностных скоростей как по ширине, так и по длине потока;

3) облегчение проникновения мелкого льда и шуги в более глубокие слои потока, обусловленное продольно-винтовым движением и создающее благоприятные условия для закупорки сечения ниже уровня поверхности плавающих льдин;

4) постепенное нагромождение льдин у внешнего берега, вызывающее уменьшение площади сечения и соответствующее увеличение скоростей. Возрастание скоростей будет усиливать интенсивность нагромождения льда у внешнего берега.

Перечисленные явления будут вызывать стеснение русла и условно способствовать образованию затора. Несомненное ухудшение условий транзита льда на изгибе далеко не всегда будет достаточным для образования затора. Возможность заторообразования на поворотах определяется:

- а) радиусом кривизны поворота;
- б) углом поворота;
- в) скоростями течения.

Рассмотрим влияние этих факторов несколько подробнее.

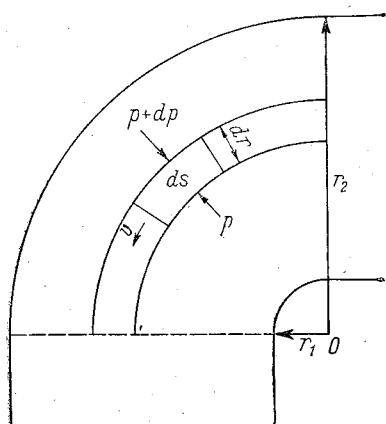


Рис. 1. Схема движения льда на изгибе

Учитывая сложность движения на изгибе естественного русла, для выяснения степени влияния отдельных факторов примем некоторые упрощения, общие как для малых, так и для больших рек:

1) скорость движения льдин на входном створе одинакова по всей ширине сечения;

2) густота ледохода $\varphi = 1,0$ постоянна.

Разделим поверхность потока, покрытую плавущим льдом, на узкие ленты — полосы шириной dr (рис. 1). Попробуем определить давление, оказываемое произвольно выбранной полосой на прилегающую к ней внешнюю ленту, или для крайней полосы — на внешний берег. Поскольку на изгибе дополнительным условием будет возникновение центробежных сил, приложенных к внешним полосам или к берегу, главную роль будет играть центробежная сила

$$F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

Рассмотрим объем льда толщиной h , длиной ds и шириной dz , равной ширине элементарной полосы. На грани, направленной к внутреннему берегу, давление будет равно p , на грани, направленной к внешнему берегу, $p + dp$, т. е. при изменении расстояния от внутреннего

берега на dz давление изменится на dp . Одновременно dr можно рассматривать как приращение радиуса кривизны. Принимая за основу формулу $F_u = \frac{mv^2}{r}$ и учитывая, что $m = \rho hdsdr$, где $hdsdr$ — объем элемента, ρ — плотность льда, получим приращение давления в ледяном покрове

$$dp = \frac{F_u}{hds} = \frac{\rho hds dr v^2}{hdsr} = \rho v^2 \frac{dr}{r}, \quad (2)$$

откуда

$$p = \int_{r_1}^{r_2} \rho v^2 \frac{dr}{r} = \rho v^2 \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (3)$$

где r_2, r_1 — радиусы кривизны внешнего и внутреннего берегов.

Давление на внешние полосы или на берег повлечет за собой возникновение сил сопротивления — сил трения льда по берегу или между льдинами. Для такого упрощенного случая можно принимать трение, подчиняющимся закону Амонтона

$$F_{тр} = k_{тр} N, \quad (4)$$

а не двучленному закону трения, что в действительности должно иметь место для льда ($F_{тр}$ — сила трения, $k_{тр}$ — коэффициент трения, N — сила давления).

Следовательно, сила трения будет прямо пропорциональна боковому давлению льда.

Анализируя формулу (3), можно сделать следующие выводы:

а) поскольку степень торможения льда на изгибе зависит от величины бокового давления, можно заключить, что дополнительная сила сопротивления движению льда пропорциональна натуральному логарифму отношения радиусов кривизны внешнего и внутреннего бе-

регов, или до некоторой степени определяется самим отношением $\frac{r_2}{r_1}$;

б) при равных скоростях течения на подходе, одинаковой толщине льда и малых размерах льдин боковое давление льда будет зави-

сать только от отношения $\frac{r_2}{r_1}$ и для разных рек будет одинаковым при

равенстве отношений $\frac{r_2}{r_1}$. Вместо отношений радиусов кривизны берегов

можно взять за основу ширину реки и радиус кривизны внутреннего

берега, учитывая, что $B = r_2 - r_1$; $r_2 = B + r_1$ и $m = \frac{B}{r_1}$. Тогда $B = mr_1$,

$$\begin{aligned} \ln \frac{r_2}{r_1} &= \ln \frac{B + r_1}{r_1} = \ln \frac{mr_1 + r_1}{r_1}, \\ \ln \frac{r_2}{r_1} &= \ln \frac{r_1(m + 1)}{r_1} = \ln(m + 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Используя обобщенные Н. А. Ржаницыным [10] материалы по морфометрическим исследованиям различных рек, можно вычислить зна-

чения $\ln \frac{r_2}{r_1}$ для рек различной величины, принимая за основу значения радиусов кривизны по оси потока и ширину рек на различных участках (табл. 1). Как видно из данных табл. 1 значения $\ln \frac{r_2}{r_1}$, характеризующие давление льда на внешний берег, для больших и малых рек в общем близки по величине. Если радиусы кривизны поворотов на больших реках возрастают, уменьшая величину центробежных сил, то соответственно возрастает и ширина реки, а с нею и масса льда, компенсируя тем самым убывание давления за счет уменьшения радиуса кривизны. Для малых рек при меньших радиусах кривизны оказывается меньше и ширина реки, соответственно и масса льда.

Таблица 1

Значения $\frac{r_2}{r_1}$ и $\ln \frac{r_2}{r_1}$ для различных рек

№ п/п	Река	$r_{\text{ср}}$	B	$\frac{r_2}{r_1}$	$\ln \frac{r_2}{r_1}$
-------	------	-----------------	-----	-------------------	-----------------------

Средние значения

1	Волга	2000	500	1,29	0,25
2	Кама	2500	500	1,22	0,20
3	Ока	1500	333	1,25	0,22
4	Днепр	2200	550	1,28	0,25
5	Дон	1500	300	1,22	0,20
6	Чикой	250	56	1,25	0,22
7	Мокша	200	57	1,36	0,31

Экстремные значения

1	Волга	3750	536	1,15	0,14
2	"	1000	500	1,67	0,51
3	Кама	6000	500	1,09	0,09
4	"	1000	400	1,50	0,41
5	Ока	5000	336	1,08	0,08
6	"	1000	666	2,00	0,69
7	Днепр	3000	430	1,16	0,15
8	"	1500	1000	2,00	0,69
9	Дон	6000	300	1,05	0,05
10	"	250	166	2,00	0,69
11	Чикой	700	88	1,13	0,12
12	"	150	76	1,68	0,52
13	Мокша	475	60	1,13	0,12
14	"	75	32	1,54	0,43

Следует иметь в виду, что приведенные расчеты и выводы относятся к некоторым средним, наиболее часто встречающимся изгибам русла. Не исключена возможность существования в отдельных случаях очень крутых изгибов, которые безусловно представляют особый интерес в смысле заторообразования.

Н. А. Ржаницыным приведены экстремальные значения радиусов кривизны и ширин русла для тех же рек. Аналогичные расчеты для

$\ln \frac{r_2}{r_1}$ произведены и для экстремальных значений радиусов кривизны.

В особо неблагоприятных условиях для больших и малых рек в общем выдерживаются те же соотношения, и значения $\ln \frac{r_2}{r_1}$ мало отличаются друг от друга.

На рис. 2 приведены графики зависимости давления льда на 1 см^2 поверхности внешнего берега от величины $\frac{r_2}{r_1}$ для скоростей 1,0; 2,0;

3,0 м/сек. Общий вид зависимостей, представляющих собой модификации логарифмической кривой, свидетельствует о том, что величина давления, как и следовало ожидать (пропорциональность квадрату скорости), в большей степени зависит от скорости движения льда. В частности, для скоростей $v \leq 1,0 \text{ м/сек}$, сколько-нибудь заметное изменение давления происходит в диапазоне до 5, и даже при больших значе-

ниях $\frac{r_2}{r_1}$ практически пренебрежимо мало.

При скоростях $2,0 \leq v < 3,0$ во всем диапазоне возможных в натуре соотношений

$\frac{r_2}{r_1}$ происходит заметное увеличение давле-

ния. При $v \geq 3,0 \text{ м/сек}$ наблюдается резкое возрастание давления при относительно малых изменениях $\frac{r_2}{r_1}$.

В нормальных естественных условиях, как правило, значения $\frac{r_2}{r_1}$ изменяются сравнительно мало — от 1,10 до 2,00, в среднем от 1,20 до 1,30. При таких условиях заметное влияние кривизны русла начинает сказываться лишь при скоростях более 2,0 м/сек.

Вторым немаловажным фактором, способствующим стеснению льда на изгибах, является величина угла поворота. При наличии дополнительного сопротивления движению льда на изгибе за счет возросшей силы трения работа этой силы будет представлять собой произведение силы на пройденный путь. Путь же, на котором продолжается действие силы трения, для элементарной полосы есть длина дуги определенного радиуса $s = \alpha r$, т. е. произведение угла поворота на радиус кривизны. Чем больше угол, тем больше длина дуги и тем больше работа силы трения, снижающая кинетическую энергию движущегося льда и уменьшающая его скорость.



Рис. 2. Кривые зависимости бокового давления от отношения $\frac{r_2}{r_1}$

Принятые ранее упрощения в отношении движения льда на изгибе русла, позволяют выявить долю участия основных характеристик изгиба в процессе транзита льда, но не дают достаточно полного представления о движении льда на повороте в естественных условиях.

Для более полной характеристики движения необходимо учесть дополнительно следующие условия:

а. На участке подхода распределение скоростей льда также, как и поверхностных скоростей потока, неравномерно по ширине:

б. Все элементарные полосы оказывают давление на внешний берег за счет возникновения центробежных сил. Расчетная величина давления на внешний берег по радиальному створу может быть приближенно определена по формуле (3), причем ввиду того, что льдины у внутреннего берега с меньшим радиусом кривизны движутся с повышенными скоростями и по меньшей дуге, угловые скорости их оказываются больше, чем у льдин, прилежащих к внешнему берегу, а линейные скорости уравниваются в первом приближении, что дает возможность принять к расчету их линейные скорости.

в. В условиях прохождения льдом поворота происходят дополнительные потери энергии льда и уменьшение работы влекущих сил по сравнению с движением на прямолинейном участке. Ввиду того, что

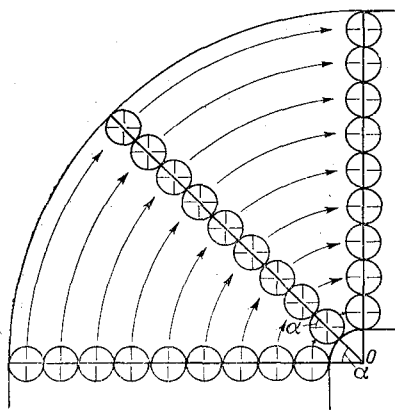


Рис. 3. Схема поворота льдин на изгибе

массы воды, проходящие поворот, стремятся преодолеть его с наименьшими потерями энергии, свободно плавающие тела проходят поворот, не меняя своей ориентации в пространстве (поплавок Миловича). Такой характер прохождения поворота ведет к тому, что плавающие на поверхности льдины должны совершать поворот на некоторый угол относительно русла и соседних льдин (рис. 3). При достаточно густом ледоходе этот поворот может и не осуществляться, но на преодоление его должна быть затрачена энергия, равная работе сил трения, препятствующих повороту.

Если на прямолинейном участке влекущие силы действуют в направлении перемещения, работа их принимает максимальное значение. На повороте в результате продольно-винтового движения направление влекущих сил не совпадает с направлением перемещения льдин, составляя с ним некоторые переменные углы α . Работа влекущих сил становится меньше, чем до поворота: $A = Fs \cos \alpha$, где угол α отличен от нуля.

Рассмотрев условия прохождения льда через криволинейный участок русла, необходимо выявить некоторые средние количественные соотношения потерь энергии и оценить эти потери с точки зрения возможности образования первичного затора.

На изгибе русла возникают потери энергии за счет трения льда по внешнему берегу и вращения льдин относительно друг друга, уменьшается также работа влекущих сил.

Работа сил трения по внешнему берегу равна потере энергии

$$\Delta E_{\text{тр}} = \frac{k_{\text{тр}} s m v^2}{R} \quad (6)$$

Отношение потерь энергии к энергии льда на входном створе равно

$$\frac{\Delta E_{\text{тр}}}{E_{\text{кин}}} = \frac{2k_{\text{тр}} s m v^2}{R m v^2} = 2k_{\text{тр}} s \frac{1}{R} = \frac{2k_{\text{тр}} s}{R}. \quad (7)$$

Для угла поворота $\alpha = \frac{s}{R} = \frac{\pi}{2}$ при $k_{\text{тр}} = 0,1$ $\frac{\Delta E_{\text{тр}}}{E_{\text{кин}}} = 2 \cdot 0,1 \cdot \frac{3,14}{2} \approx 0,3$,
при $\alpha = \frac{s}{R} = \pi$ $\frac{\Delta E_{\text{тр}}}{E_{\text{кин}}} = 2k_{\text{тр}} \pi = 0,2 \cdot 3,14 = 0,6$. Потери энергии на

повороте за счет возрастания сил трения составляют 30—60% кинетической энергии льда на входном створе.

Принимая льдину за диск радиусом r , массой m и обладающей угловой скоростью вращения ω_1 , кинетическая энергия вращения отдельной льдины будет равна

$$E_{\text{вр}} = \frac{m r^2 \omega_1^2}{4}; \quad (8)$$

кинетическая энергия той же льдины на входном створе

$$E_{\text{кин}} = \frac{m v_0^2}{2}. \quad (9)$$

Отношение потери энергии на вращение к кинетической энергии льдины на входном створе будет

$$\frac{E_{\text{вр}}}{E_{\text{кин}}} = \frac{m r^2 \omega_1^2 \cdot 2}{4 m v_0^2} = \frac{r^2 \omega_1^2}{2 v_0^2}, \quad (10)$$

где v_0 — линейная скорость движения льдины на повороте. Выразив линейную скорость через угловую, получим

$$\frac{E_{\text{вр}}}{E_{\text{кин}}} = \frac{r^2 \omega_1^2}{2 R^2 \omega_0^2}, \quad (11)$$

где R — радиус кривизны поворота.

На рис. 3 видно, что угловые скорости вращения льдины и движения ее по дуге на повороте равны. Можно считать, что $\omega_1 \approx \omega_0$, тогда

$$\frac{E_{\text{вр}}}{E_{\text{кин}}} = \frac{r^2}{2 R^2}. \quad (12)$$

Приняв к расчету два крайних случая большой и малой кривизны поворота с соответствующими значениями $R_1 = 1000$ м, $R_2 = 100$ м

и радиусом льдины $r = 10$ м, получим: $\frac{E_{\text{вр}}}{E_{\text{кин}}} = \frac{10^2}{2 \cdot 1000^2} = 0,00005$,

$$\frac{E_{\text{вр}}}{E_{\text{кин}}} = \frac{10^2}{2 \cdot 100^2} = 0,005.$$

Окончательно можно считать, что потери энергии на преодоление вращения льдин составляют до 0,5% кинетической энергии льда на входном створе.

Уменьшение работы влекущих сил на повороте. Работа влекущих сил на прямолинейном участке равна $A_{вл} = Fs$; работа влекущих сил

на повороте $A'_{вл} = Fs \cos \alpha$; тогда $\frac{A'_{вл}}{A_{вл}} = \cos \alpha$, при $\alpha = 30^\circ$,

$$\frac{A'_{вл}}{A_{вл}} = \cos 30^\circ \approx 0,15.$$

При благоприятной форме сечения, считая изгиб русла единственным осложняющим ледоход фактором, в первом приближении некоторая доля энергии движущегося льда при прохождении изгиба будет теряться за счет:

а) возрастания сил трения по внешнему берегу и возрастания бокового давления льда (до 60% кинетической энергии льда на входном створе);

б) преодоления вращения льдин (до 0,5—1,0% кинетической энергии льда на входном створе).

Уменьшение работы влекущих сил составляет до 15% от работы влекущих сил на прямолинейном участке. На долю энергии, необходимой для поддержания свободного транзита льда, остается около 40% кинетической энергии льда на входном створе и 85% работы влекущих сил, что в большинстве случаев обеспечивает беззаторное прохождение ледохода.

При наличии дополнительных сопротивлений в русле на изгибе работы этих сил не должна превышать 40% кинетической энергии льда на входном створе, плюс 85% работы влекущих сил на прямолинейном участке подхода, в противном случае затор становится неизбежным.

Выводы

1. На малых реках в силу больших значений относительных размеров льдин заторообразование носит более случайный характер, чем на больших реках.

2. Основными факторами, ухудшающими транзит льда на изгибах русла, являются:

- а) радиус кривизны поворота;
- б) скорость движения льда;
- в) угол поворота.

3. Давление льда на внешний берег при прохождении поворота может быть приближенно вычислено по формуле

$$p = \rho v^2 \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

4. При прочих равных условиях давление льда на внешний берег зависит от соотношения радиусов кривизны берегов. Это соотношение приблизительно одинаково как для больших, так и для малых рек

и составляет в среднем 1,20—1,30. При таких значениях $\frac{r_2}{r_1}$ влияние кривизны поворота сказывается лишь при скоростях движения льда более 2,0 м/сек.

5. Суммарные потери энергии льда за счет преодоления поворота составляют около 60% кинетической энергии льда на входном створе. Учитывая имеющее место уменьшение работы влекущих сил до 15%, для обеспечения беззаторного прохождения ледохода на изгибе остается 40% кинетической энергии льда на входном створе и до 85% работы влекущих сил, что при отсутствии дополнительных факторов оказывается достаточным для относительно свободного транзита льда на повороте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ангелопуло П. П. Динамика заторов льда на р. Западной Двине в районе г. Яунелгавы. Сб. работ Рижской ГМО, вып. 6, Рига, 1964.
2. Ангелопуло П. П. О некоторых особенностях заторообразования. Сб. работ Рижской ГМО, вып. 7, Рига, 1965.
3. Быдин Ф. И. К вопросу исследования ледоходного режима рек. Зап. ГГИ. т. 4. Изд. ГГИ, Л., 1931.
4. Берг В. А. О гидродинамических условиях ледостава и ледотранзита на водотоках. Тр. ЛГМИ, вып. 4, 1956.
5. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
6. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения. Изд. АН СССР, Новосибирск, 1962.
7. Ляпин А. Н. О повороте речного потока с отрывом течения от выпуклого берега. Метеорология и гидрология, № 9, 1962.
8. Коновалов И. М. О скорости плавающего тела в потоке. Тр. ЛИИВТ, вып. 5. 1934.
9. Проскуряков Б. В. К анализу дрейфа ледяных полей. Проблемы Арктики, № 5, 1941.
10. Ржаницын Н. А. Морфологические и гидрологические особенности строения речной сети. Гидрометеиздат, Л., 1960.
11. Шуляковский Л. Г. О заторах льда и заторных уровнях при вскрытии рек. Метеорология и гидрология, № 7, 1951.

О СРЕДНИХ СКОРОСТЯХ В КРУГОВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОДОВОРОТЕ

При решении некоторых гидротехнических задач возникает необходимость в определении роли водоворотных областей в потоках, образующихся при отрыве струи от берегов и дна. Отрыв струи наблюдается, как правило, при резком увеличении живого сечения русла, которое может быть как в плане, так и по глубине. Резкое плановое расширение с образованием водоворотов имеет место, например, в водохранилищах-охладителях, когда струя сбрасываемой теплой воды продвигается от водосброса к водозабору. В этих случаях водоворотные области охватывают порой значительную часть площади водохранилища, роль которых в охлаждающей способности водохранилища оценивается приближенным коэффициентом использования. Поэтому получение зависимостей, позволяющих рассчитывать скорости течения в водоворотах водохранилищ-охладителей [1], нижних бьефов гидроузлов [2] и других случаях является одной из первоочередных задач.

В настоящей работе дается расчет средних скоростей по глубине в случае кругового цилиндрического водоворота, который может иметь место, например, при рядом расположенных водосбросе и водозаборе.

Предположим, что движение в круговом цилиндрическом водовороте установившееся и осуществляется по круговым траекториям. В связи с этим для решения задачи примем цилиндрическую систему координат, в которой одна ось направлена по радиусу, а другая совпадает с осью водоворота. Считаем также, что вращение жидкости в водовороте происходит только за счет касательного усилия транзитной струи, возникающего на поверхности раздела струя-водоворот.

Для составления уравнения движения водоворота радиусом R , высотой H и продольным уклоном $I = 0$ выделим элементарное цилиндрическое кольцо шириной Δr . Среднюю по глубине скорость движения элементарного кольца обозначим через v .

На выделенный элемент будут действовать следующие силы, определяющие его движение:

1) силы касательного напряжения на внутренней и внешней поверхностях элементарного цилиндрического кольца:

$$P_1 = -\tau_1 2\pi r H \quad (1)$$

и

$$P_2 = \tau_2 2\pi (r + \Delta r) H, \quad (2)$$

где τ_1 и $\tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau_1$ — касательные напряжения соответственно на внутренней и внешней поверхностях элементарного кольца;

$2\pi r$ и $2\pi(r + \Delta r)$ — длина соответственно внутренней и внешней окружностей элементарного кольца;

2) силы трения по дну

$$P_3 = -\frac{\gamma v^2}{C^2} 2\pi \left(r + \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta r, \quad (3)$$

где γ — удельный вес жидкости;

C — скоростной коэффициент формулы Шези.

Проекция этих сил на ось, перпендикулярную радиусу, с последующим их суммированием дает

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (1) — (4), найдем

$$-\tau_1 \cdot 2\pi r H + (\tau_1 + \Delta\tau_1) 2\pi (r + \Delta r) H - \frac{\gamma v^2}{C^2} 2\pi \left(r + \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta r = 0. \quad (5)$$

После раскрытия в уравнении (5) скобок и деления всех членов на $2\pi r H \Delta r$ получим

$$\frac{1}{r} \tau_1 + \frac{\Delta\tau_1}{\Delta r} + \frac{1}{r} \Delta\tau_1 - \frac{1}{H} \cdot \frac{\gamma v^2}{C^2} - \frac{1}{rH} \cdot \frac{\gamma v^2}{C^2} \cdot \frac{\Delta r}{2} = 0. \quad (6)$$

В этом уравнении третье и пятое слагаемые по сравнению с остальными имеют малый порядок величин, поэтому их мы можем отбросить. Одновременно малые приращения заменим их дифференциалами

$$\frac{1}{r} \tau_1 + \frac{d\tau_1}{dr} - \frac{1}{H} \cdot \frac{\gamma v^2}{C^2} = 0. \quad (7)$$

Затем в уравнение (7) подставим значение касательного напряжения

$$\tau_1 = A \frac{dv}{dr}, \quad (8)$$

где A — среднее по вертикали значение коэффициента турбулентного обмена.

Коэффициент турбулентного обмена примем, по А. В. Караушеву [3],

$$A = \frac{\gamma H v}{MC}. \quad (9)$$

В формуле (9) для пределов $10 \leq C \leq 60$ параметр M равен

$$M = 0,7 C + 6, \quad (10)$$

а для пределов $60 \leq C \leq 90$

$$M = \text{const} = 48. \quad (11)$$

Подставляя значение τ_1 в формулу (7) и отбрасывая члены малого порядка, получим уравнение

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\gamma H v}{MC} \cdot \frac{dv}{dr} + \frac{\gamma H}{MC} \cdot \frac{d}{dr} \left(v \frac{dv}{dr} \right) - \frac{1}{H} \cdot \frac{\gamma v^2}{C^2} = 0. \quad (12)$$

Продифференцируем второе слагаемое (12)

$$\frac{d}{dr} \left(v \frac{dv}{dr} \right) = v \frac{d^2 v}{dr^2} + \left(\frac{dv}{dr} \right)^2. \quad (13)$$

Подставив значение дифференциала (13) и (12) и произведя одновременно умножение всех слагаемых уравнения на $\frac{MC}{\gamma H v}$, получим нелинейное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dr} \right)^2 + \frac{1}{r} \cdot \frac{dv}{dr} - \frac{M}{CH^2} v = 0. \quad (14)$$

После приведения уравнения (14) к безразмерному виду путем введения относительной скорости

$$\tilde{v} = \frac{v}{v_{\max}} \quad (15)$$

и относительного радиуса

$$\tilde{r} = \frac{r}{R} \quad (16)$$

(значение скорости $v_{\max}$ определяется при $r = R$) будем иметь

$$\frac{d^2 \tilde{v}}{d\tilde{r}^2} + \frac{1}{\tilde{v}} \left(\frac{d\tilde{v}}{d\tilde{r}} \right)^2 + \frac{1}{\tilde{r}} \cdot \frac{d\tilde{v}}{d\tilde{r}} - \frac{M}{C} \left(\frac{R}{H} \right)^2 \tilde{v} = 0. \quad (17)$$

Введем обозначение

$$\tilde{B} = \frac{M}{C} \left(\frac{R}{H} \right)^2, \quad (18)$$

где C определим, например, по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} H^{1/6}, \quad (19)$$

в которой n — коэффициент шероховатости. Тогда уравнение (17) приобретет вид

$$\frac{d^2 \tilde{v}}{d\tilde{r}^2} + \frac{1}{\tilde{v}} \left(\frac{d\tilde{v}}{d\tilde{r}} \right)^2 + \frac{1}{\tilde{r}} \cdot \frac{d\tilde{v}}{d\tilde{r}} - \tilde{B} \tilde{v} = 0. \quad (20)$$

По первым приближенным подсчетам величина $\tilde{B}$ изменяется в следующих пределах:

$$\tilde{B} = 10 \div 10^5. \quad (21)$$

Нелинейное уравнение (20) аналитического решения не имеет. Поэтому решение его будем проводить с помощью численных методов. Примем, например, метод конечных разностей решения краевых задач [4], решение которым данной задачи проводится следующим образом.

Радиус водоворота $\tilde{R}$ разбивается на k равных частей точками в направлении от центра водоворота

$$\tilde{r}_i = ix, \quad (22)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, k$; $\tilde{x} = \frac{\tilde{R}}{k}$. Затем в каждой из точек первая и вторая производные (20) заменяются соответственно следующими численными выражениями:

$$\frac{d\tilde{v}}{d\tilde{r}} = \frac{\tilde{v}_{i+1} - \tilde{v}_{i-1}}{2\tilde{x}}, \quad (23)$$

$$\frac{d^2\tilde{v}}{d\tilde{r}^2} = \frac{\tilde{v}_{i+1} - 2\tilde{v}_i + \tilde{v}_{i-1}}{\tilde{x}^2}. \quad (24)$$

Если теперь к полученным линейным алгебраическим уравнениям присоединим граничные условия:

$$1) \text{ при } \tilde{r}_0 = 0 \quad \tilde{v} = 0, \quad (25)$$

$$2) \text{ при } \tilde{r}_k = \tilde{R} \quad \tilde{v} = \tilde{v}_{\max}, \quad (26)$$

то образуется система из $k + 1$ уравнений, из которой и определяются значения скоростей $\tilde{v}_0, \tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_k$. Эта система имеет единственное решение.

Расчетные кривые, полученные в результате решения уравнения (20) названным методом при следующих исходных данных:

1-я кривая $\tilde{B}_1 = 5,581 \cdot 10^1$; $H = 5$ м; $R = 50$ м; $n = 0,015$;

2-я кривая $\tilde{B}_2 = 2,233 \cdot 10^2$; $H = 10$ м; $R = 200$ м; $n = 0,015$;

3-я кривая $\tilde{B}_3 = 5,417 \cdot 10^4$; $H = 2$ м; $R = 500$ м; $n = 0,030$,

показаны на рис. 1. Эти кривые хорошо аппроксимируются довольно простой и удобной при расчетах степенной зависимостью, отвечающей параболе b -го порядка (рис. 2)

$$\tilde{v} = \tilde{r}^b, \quad (27)$$

где b — численный коэффициент.

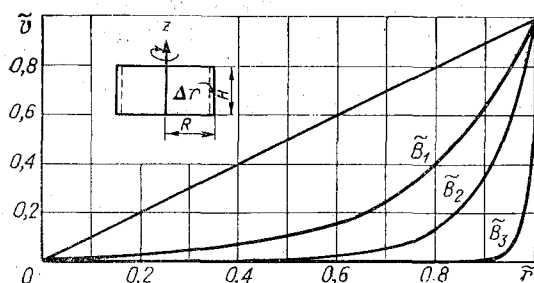


Рис. 1. Распределение средних скоростей по радиусу в круговом цилиндрическом водовороте:

$$\tilde{B}_1 = 5,581 \cdot 10^4; \quad \tilde{B}_2 = 2,233 \cdot 10^2; \quad \tilde{B}_3 = 5,417 \cdot 10^4$$

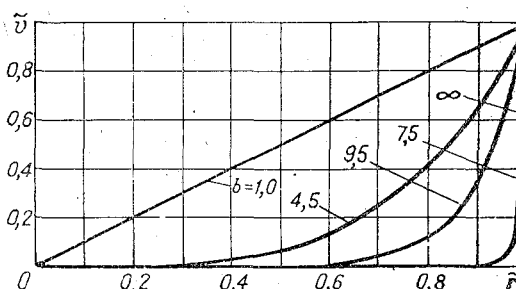


Рис. 2. Распределение средних скоростей по радиусу в круговом цилиндрическом водовороте по зависимости (27)

Показатель степени b может принимать значения в зависимости от условий задачи в интервале $1 \leq b \leq \infty$, что должно соответствовать (при крайних значениях b) прямой, наклонной к оси абсцисс под углом 45° ($b = 1$ — жидкость вращается как твердое тело), и вертикальной прямой, проходящей через точку $\tilde{r} = \tilde{R}$ ($b = \infty$ — жидкость в водовороте не вращается).

Выводы

1. Распределение средних скоростей по радиусу в круговом цилиндрическом водовороте (от периферии к центру) при неподвижном дне подчиняется не прямолинейному закону, как это иногда принимается при решении соответствующих задач [5, 6], а криволинейному, описываемому параболой.

2. Резкое уменьшение значений средних скоростей, практически до нуля, происходит в первой трети радиуса водоворота; увеличение шероховатости дна и уменьшение относительной глубины потока приводит к уменьшению этого расстояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернадский Н. М. и Проскуряков Б. В. Опыт теории и практики расчета прудов-холодильников. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, вып. V. Госэнергоиздат, Л.-М., 1931.
2. Леви И. И. Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений. Госэнергоиздат, М.-Л., 1955.
3. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометеоздат, Л., 1960.
4. Березин И. С. и Жидков Н. П. Методы вычислений, т. II. Госфизматлитиздат, М., 1960.
5. Безызвестных А. В. О построении плана течений в прудах-охладителях. Труды ГГИ, вып. 69, 1959.
6. Замбахидзе Г. Н. Движение реальной жидкости и твердых тел на криволинейных участках рек. «Сабчота Сакартвело», Тбилиси, 1967.

О РАСЧЕТЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В КРУГОВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОДОВОРОТЕ

1. Введение

Увеличивающиеся мощности современных ТЭЦ до 2—3 млн. квт и более и освоение относительно нового типа электростанций (атомных) требуют более строгого подхода к гидротермическому расчету водохранилищ-охладителей. Это требование еще более существенно, когда проектируемое водохранилище находится в зоне с недостаточным питанием водой или по какой-либо причине не могут быть созданы большие его размеры. Существующие же в настоящее время методы расчета водохранилищ-охладителей [1] ввиду сложности водо- и теплообменных процессов, протекающих в них, и сложности гидротермического моделирования этих процессов пока не дают желаемого результата. При этом в расчетной схеме охладителя одним из основных слабых звеньев считается неопределенность коэффициента K (так называемого коэффициента использования пруда-охладителя), введением в расчет которого предполагалось учесть охлаждающую способность водоворотных и застойных областей. Понятие коэффициента использования и его определение впервые было введено Н. М. Бернадским [2]. В настоящее время значение K определяется по приближенной зависимости (рис. 1) [1], построенной по данным, полученным при обследовании прудов-охладителей, размеры которых 0,5—1 км².

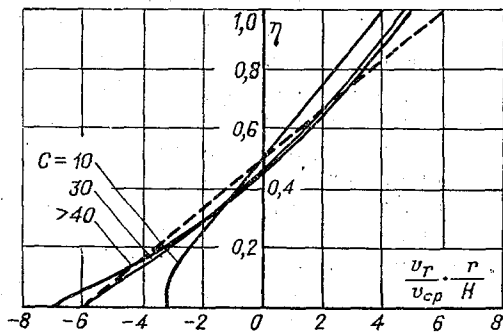


Рис. 1. Распределение поперечной скорости v_r при различных значениях коэффициента Шези C . Пунктиром показано распределение поперечной скорости по зависимости (14)

Коэффициент K зависит только от площади транзитного потока и водоворотов и не зависит ни от расположения водоворотов по длине транзитного потока, ни от нагрузки на водохранилище, ни от его глубины, ни от других факторов. Следует также отметить, что этот коэф-

фициент содержит в себе и все те неточности и недочеты, которые имели место при натурных измерениях и решении уравнения теплового баланса.

Площади водохранилищ-охладителей при современных ТЭЦ достигают 20—30 км², увеличились соответственно и глубины. Это еще больше подчеркивает пространственность, а следовательно, и сложность явлений, протекающих в охладителях. Следовательно, уточнение коэффициента использования K (рассмотрение работы водоворота) имеет не только большой научный интерес, но и важное практическое значение.

Таким образом, если благодаря работам Н. М. Бернадского, Б. В. Проскурякова [2, 3] и др. ясна роль транзитного потока в охлаждающей способности водохранилища, то роль водоворотных и застойных областей из-за отсутствия достаточно развитой теории взаимодействия транзитного потока и водоворота, гидромеханики водоворота и отсутствия полных и надежных натурных данных пока еще не определена.

К разработке новой или уточнению существующей методики расчета водохранилищ-охладителей с учетом новых требований обращались в последнее время Г. В. Востржел, В. М. Лятхер, А. В. Безывестных, Е. К. Трубина, А. Н. Соловьев и др. Но задача по-прежнему осталась не решенной, хотя подход к решению ее каждого из исследователей был отличен один от другого. В настоящей работе также предпринята попытка решения гидравлической части общей задачи гидротермического расчета водохранилища-охладителя. Анализируется один из фрагментов водохранилища-охладителя — водоворот. При этом в связи со сложностью рассматриваемого вопроса на первом этапе решается пространственная задача для кругового цилиндрического водоворота, как представляющего наиболее простейшую его форму.

Водоворот (водоворотная область) является в основном следствием конфигурации водохранилища, конструкции и компоновки сооружений, величины циркуляционного расхода и некоторых других факторов. Названные факторы, как правило, известны, а поэтому площадь, занимаемая водоворотом, их месторасположение на акватории водохранилища и форма могут быть определены при построении плана транзитного потока одним из существующих методов. Следовательно, в результате построения плана транзитного потока мы можем определить радиус водоворота R , глубину H и среднюю скорость течения по глубине v на границе взаимодействия транзитной струи и водоворота. Обычно известна и шероховатость дна n в зоне водоворота.

Используя эти сведения, будем искать решение для кругового цилиндрического водоворота в виде следующих зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} v_{\varphi} &= f(R, H, v, n) \\ v_r &= f(R, H, v, n) \\ v_z &= f(R, H, v, n) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где v_{φ} , v_r , v_z — соответственно продольная, радиальная и вертикальная скорости. Будем считать также, что движение жидкости в водовороте осуществляется только за счет касательного усилия, развиваемого на границе взаимодействия транзитная струя — водоворот.

2. Краткий обзор литературы

Как уже отметили выше, впервые значения водоворотов в охлаждении отработанной воды было определено Н. М. Бернадским. Почти 30 лет спустя этим же вопросом, т. е. выявлением роли водоворотов в охлаждающей способности водохранилища-охладителя и взаимодействием транзитной струи и водоворота, стали заниматься А. В. Безызвестных [4] и Е. К. Трубина [5, 6].

А. В. Безызвестных предложил учитывать количество тепла, поступающего от транзитной струи к водовороту, через коэффициент турбулентной диффузии D_z по уравнению

$$Q_t = \gamma D_z \frac{\Delta t_z}{\Delta z} L h. \quad (2)$$

Коэффициент турбулентной диффузии равен

$$D_z = \frac{g}{\gamma} A_z, \quad (3)$$

где A_z — коэффициент виртуальной вязкости;

g — ускорение свободного падения;

γ — удельный вес жидкости.

При этом Безызвестных не оговаривает, что коэффициент D_z в той трактовке, как он предлагает (D_z — коэффициент, определяющий водообмен транзитной струи с водоворотом и учитывающий турбулентное перемешивание и поперечную циркуляцию), может быть найден только путем непосредственных измерений в натуре [7]. Поэтому выведенная им зависимость (16) [4] для вычисления D_z и дальнейшего использования в уравнении (2) не применима.

В работах [5, 6] также ставится вопрос об определении расхода водообмена между транзитной струей и водоворотом, который должен отразить охлаждающую способность водоворота. Автор определяет этот расход по следующей зависимости [6]:

$$\bar{Q}_{об} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{\Omega} \vec{v}'_N d\Omega dt, \quad (4)$$

где T — период осреднения;

$\vec{v}'_N$ — поперечная пульсационная составляющая мгновенной скорости одного направления (как это пишет автор);

$d\Omega$ — элемент площади поверхности раздела (Ω) между транзитной струей и водоворотом.

Однако в выражении (4) пульсационная составляющая мгновенной скорости $\vec{v}'_N$ не характеризует водообмен между транзитной струей и водоворотом, так как пульсация скорости определяет только лишь интенсивность турбулентности (турбулентный перенос), а водообмен, как таковой, должен осуществляться одной из составляющих скорости: v_ϕ , v_r или v_z . При наличии же водоворотов, когда транзитная струя поворачивает с некоторым радиусом R , существует водообмен, обусловленный поперечной циркуляцией потока, на который накладывается турбулентный перенос, вызванный пульсацией

скорости и другими факторами. Поперечная циркуляция, представленная радиальной скоростью v_r , возникает в результате действия центробежной силы на жидкость при ее движении по криволинейной траектории. Следовательно, выражение (4) должно быть записано в виде следующего интеграла:

$$Q_{06} = \frac{1}{2T} \int_0^T \int_{\Omega} V \overline{v_r^2} d\Omega dt. \quad (5)$$

Следует заметить также, что в водохранилище-охладителе имеет место и второй, также существенный вид скорости, действующий в поперечном направлении к потоку — скорость v_k . Это так называемая, конвективная скорость, обусловленная конвекцией вследствие наличия разницы температур между транзитным потоком, имеющим повышенную температуру, и водоворотом с более низкой температурой воды. Определение v_k представляет самостоятельную задачу, поэтому в данной работе этот вопрос не рассматривается. С учетом же v_k выражение (5) запишется следующим образом:

$$Q_{06} = \frac{1}{2T} \int_0^T \int_{\Omega} (V \overline{v_r^2} + V \overline{v_k^2}) d\Omega dt. \quad (6)$$

В работах [8—11] рассматриваются совершенно новые приемы расчета охладителей. При этих расчетах отпадает необходимость в выделении отдельно транзитного потока и водоворотной области, а следовательно, и необходимость определения коэффициента использования K . Каждый из приемов предусматривает исследование на модели.

Предлагаемые приемы позволяют осуществить лишь приближенный расчет охладителя вследствие принятия различного рода допущений, вынужденного искажения масштаба при моделировании и требуют подтверждения результатами натуральных наблюдений.

3. Решение задачи движения жидкости в круговом цилиндрическом водовороте

Для решения пространственной задачи движения турбулентного потока в круговом цилиндрическом водовороте примем в качестве исходной систему дифференциальных уравнений 0. Рейнольдса и уравнение неразрывности в цилиндрических координатах r, φ, z : $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$, $z = z$ [12—14]. В случае установившегося движения несжимаемой жидкости и при пренебрежении членами, обусловленными вязкостью, названные уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_{\varphi}^2}{r} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} + \\ + \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right) + \\ + \frac{1}{\rho} \left(2 \frac{\partial A}{\partial r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial A}{\partial z} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial A}{\partial z} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial z} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = \\
 = \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right) + \\
 + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial A}{\partial r} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial A}{\partial z} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right),
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + \\
 + \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \\
 + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial A}{\partial r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial A}{\partial r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial z} + 2 \frac{\partial A}{\partial z} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \\
 \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0,
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где r — координата направленная по радиусу;
 φ — угол поворота потока;
 z — координата, направленная перпендикулярно радиусу и совпадающая с осью водоворота;
 v_φ , v_r , v_z — соответственно продольная, радиальная и вертикальная скорости;
 A — коэффициент турбулентного обмена;
 ρ — плотность жидкости;
 g — ускорение свободного падения;
 P — давление в точке потока.

В процессе решения уравнений (7) и (8) (при практическом применении их к решению задач) используют те или иные упрощающие предпосылки и допущения, в результате которых исключаются из уравнения члены, порядок которых по сравнению с оставшимися намного ниже.

Рассматривая осесимметричную задачу [15] и имея в виду, что радиус водоворота в водохранилище-охладителе обычно много больше его глубины ($R \gg H$), проведем упрощение уравнений (7) и (8) аналогично тому, как это делает И. Л. Розовский [13]. Тогда получим для двухразмерного установившегося движения с продольным уклоном $I = 0$ следующие уравнения:

$$\left. v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = \frac{g}{\gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right), \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned}
 v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = -g I_r + \frac{g}{\gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial v_r}{\partial z} \right), \\
 \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0,
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где I_r — поперечный уклон свободной поверхности.

Далее, во втором уравнении (9) вследствие малости значений поперечных составляющих скорости v_r и v_z по сравнению с продольной v_φ (что имеет место при больших радиусах закругления [13, 16]) первые два члена можно отбросить; в результате получим уравнение, которое легко решается:

$$-\frac{v_\varphi^2}{r} = -gI_r + \frac{g}{\gamma} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial v_r}{\partial z} \right). \quad (11)$$

Это уравнение впервые было получено В. М. Маккавеевым [17], затем при решении задачи движения воды на повороте открытого русла И. Л. Розовским [13].

4. Расчетные формулы

В результате решения уравнения (11) Маккавеев получил следующую зависимость для определения поперечной скорости v_r , впоследствии несколько уточненную А. В. Караушевым [18] (условимся в дальнейшем обозначать средние скорости $(v_\varphi)_{\text{ср}}$ и $(v_\varphi)_{\text{ср max}}$ через v и v_{max}):

$$v_r = \frac{kvH}{r} \varphi(C, \eta), \quad (12)$$

где k — поперечный коэффициент, равный 1,3;

v — средняя скорость потока по вертикали;

H — глубина потока на вертикале;

z — радиус закругления;

$\varphi(C, \eta)$ — некоторая функция, зависящая от коэффициента Шези C и относительной глубины η на вертикале; она представлена в виде графиков.

Для нахождения этого выражения было применено распределение продольной скорости по квадратичной параболе Базена. Из уравнения (11) аналогичную (по структуре, но с применением логарифмического распределения по вертикали продольной скорости) зависимость находит и Розовский

$$v_r = \frac{1}{x^2} v \frac{H}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{xC} F_2(\eta) \right], \quad (13)$$

где x — параметр Кармана;

$F_1(\eta)$, $F_2(\eta)$ — некоторые функции, представленные в виде графиков и таблицы.

Кроме того, Розовский вместо выражения (13) предлагает приближенную прямолинейную зависимость (при $C = 50$)

$$v_r = \frac{1,5}{x^2} v \frac{H}{r} (2\eta - 1). \quad (14)$$

Воспользуемся формулой (14) для дальнейших расчетов. Одновременно заметим, что эта формула, как это видно на рис. 1, может быть применена в более широком интервале значений C . Хорошее совпадение кривых является следствием того, что в области больших значений C ($C \geq 30$) эпюра скорости деформируется незначительно.

Для определения распределения v_r в водовороте в формулу (14) подставим значение средних скоростей, полученных для кругового цилиндрического водоворота [15],

$$\tilde{v} = \tilde{r}^b, \quad (15)$$

где b — численный коэффициент.

После совместного решения (14) и (15) получим

$$v_r = \frac{1,5}{\chi^2} v_{\max} H \frac{r^{b-1}}{R^b} (2\eta - 1). \quad (16)$$

Для нахождения значений скоростей в вертикальном направлении (v_z) воспользуемся уравнением неразрывности (10). Подставляя в уравнение неразрывности (10) значение дифференциала, полученного при дифференцировании (16)

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} = (b-1) \frac{1,5}{\chi^2} v_{\max} H \frac{r^{b-2}}{R^b} (2\eta - 1), \quad (17)$$

и выражения (16), найдем

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -(b-1) \frac{1,5}{\chi^2} v_{\max} H \frac{r^{b-2}}{R^b} (2\eta - 1) - \frac{1,5}{\chi^2} v_{\max} H \frac{r^{b-2}}{R^b} (2\eta - 1) = \\ &= -\frac{1,5b}{\chi^2} v_{\max} H \frac{r^{b-2}}{R^b} (2\eta - 1). \end{aligned} \quad (18)$$

Введя в левую часть выражения (18) относительную ординату $\eta = \frac{z}{H}$, получим

$$\frac{\partial v_z}{\partial \eta} = -\frac{1,5b}{\chi^2} v_{\max} H^2 \frac{r^{b-2}}{R^b} (2\eta - 1). \quad (19)$$

Интегрируя выражение (19) по η от дна до свободной поверхности при принятии нулевого значения u дна и $\eta = 1$ на поверхности, имеем

$$\begin{aligned} v_z &= -\frac{1,5b}{\chi^2} v_{\max} H^2 \frac{r^{b-2}}{R^b} \eta^2 + \frac{1,5b}{\chi^2} v_{\max} H^2 \frac{r^{b-2}}{R^b} \eta = \\ &= -\frac{1,5b}{\chi^2} v_{\max} H^2 \frac{r^{b-2}}{R^b} (\eta^2 - \eta), \end{aligned} \quad (20)$$

или, освобождаясь от отрицательного значения, получаем

$$v_z = \frac{1,5b}{\chi^2} v_{\max} \left(\frac{H}{R} \right)^2 \left(\frac{r}{R} \right)^{b-2} (\eta - \eta^2). \quad (21)$$

Таким образом, зная глубину и радиус водоворота, среднюю скорость по вертикали на его периферии $v_{\max}$ и значение коэффициента Кармана χ , а также коэффициент шероховатости n , можем вычислить поперечные скорости v_r и v_z как по глубине, так и по радиусу водоворота.

Значения v_r и v_z , вычисленные по выражениям (16) и (21) при следующих исходных данных: $H = 10$ м, $R = 200$ м, $v_{\max} = 0,2$ м/сек., $n = 0,015$, $\kappa = 0,5$, $b = 9,5$, представлены на рис. 2.

Теперь вычислим расход водообмена между транзитной струей и водоворотом, обусловленный турбулентностью и поперечной циркуляцией v_r . В нашем случае он будет равен расходу воды, поступающей в водоворот,

$$Q_{об} = 2\pi R \int_0^{\frac{3}{2}} v_r d\eta \quad (22)$$

или выходящей из него

$$Q_{об} = 2\pi R \int_{\frac{3}{2}}^1 v_r d\eta. \quad (23)$$

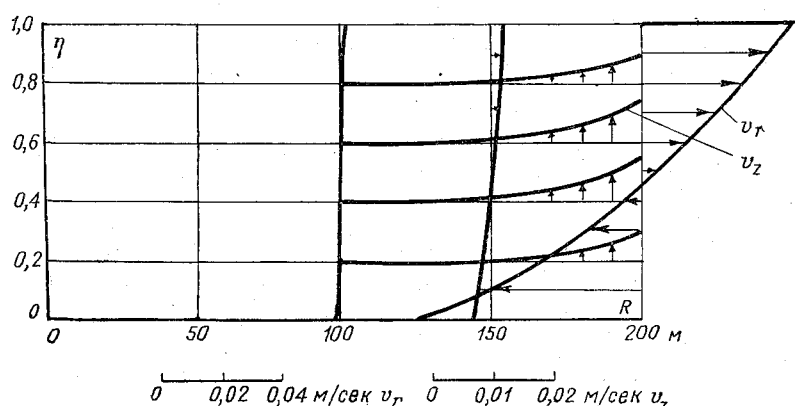


Рис. 2. Распределение поперечных скоростей v_r и v_z в круговом цилиндрическом водовороте

После подстановки (16), например, в (22) и решения определенного интеграла получим

$$Q_{об} = \frac{0,75\pi}{\kappa^2} v_{\max} H \left(\frac{r}{R} \right)^{b-1}, \quad (24)$$

а в результате введения относительной величины радиуса

$$\tilde{r}^{b-1} = \left(\frac{r}{R} \right)^{b-1} \quad (25)$$

расход водообмена будет равен

$$Q_{об} = \frac{0,75\pi}{\kappa^2} v_{\max} H \tilde{r}^{b-1}. \quad (26)$$

В случае использования для определения $Q_{об}$ уравнения (23) пределы интегрирования необходимо брать иные. Можно так же легко показать, что изменение знака направления расхода на обратный будет находиться около значения относительной глубины 0,46 (если считать от дна).

Правую часть (26) можно преобразовать, если учесть выражение числа Рейнольдса для транзитной струи

$$Re = \frac{v_{\max} H}{\nu}, \quad (27)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости.

Решая совместно (26) и (27), получим

$$Q_{об} = \frac{0,75\pi}{\kappa^2} Re \tilde{\nu} r^{b-1}. \quad (28)$$

Подставляя в (28) значение $\tilde{\nu}$, κ и относительную величину радиуса на границе водоворота $r = 1$, получим следующую зависимость расхода водообмена:

$$Q_{об} = 9,42 Re \nu. \quad (29)$$

Из формулы (29) видно, что расход водообмена между транзитной струей и водоворотом прямо пропорционален числу Re и температуре воды, учитываемой коэффициентом кинематической вязкости.

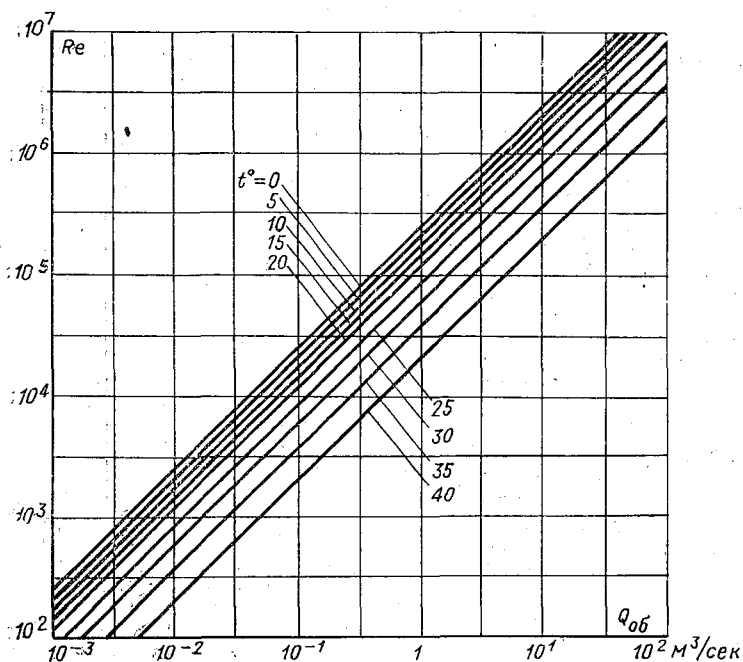


Рис. 3. Зависимость расхода водообмена между транзитной струей и круговым цилиндрическим водоворотом (при $r = 1$) от числа Re при различной температуре воды $t^\circ C$

Результаты проведенных расчетов по формуле (29) показаны на рис. 3.

Пример. Примем для кругового цилиндрического водоворота выше приведенные данные. В этом случае получим следующую величину расхода водообмена на границе струя-водоворот [по формуле (26)]:

$$Q_{об} = \frac{0,75 \cdot 3,14}{0,25} 0,2 \cdot 10 \cdot 1^{8,5} = 18,84 \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (30)$$

Выводы

1. Так же как и продольная скорость u [15], составляющие ее радиальная u_r и вертикальная u_z затухают по направлению к центру водоворота практически в пределах $\frac{1}{3} R$.

2. Схема движения жидкости в круговом цилиндрическом водовороте представляется в виде полувинта, вторая часть которого находится в пределах транзитной струи. Жидкость из транзитной струи поступает в водоворот по высоте, определяемой дном и точкой вертикали, в которой скорость равна значению u , из водоворота же выходит через вышележащую часть над этой точкой.

3. Постоянный перенос масс жидкости, а с ней той или иной субстанции из транзитного потока в водоворотную область и обратно, обусловлен в первую очередь поперечной циркуляцией. На этот циркуляционный поток накладывается турбулентный перенос жидкости, определяемый коэффициентом турбулентности A .

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические указания к расчету прудов-охладителей. Госэнергоиздат, Л., 1963.
2. Бернадский Н. М. и Проскуряков Б. В. Опыт теории и практики расчета прудов-холодильников. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, вып. V. Госэнергоиздат, Л.-М., 1931.
3. Бернадский Н. М. Теория турбулентного потока и ее применение к построению течений в открытых водоемах. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, вып. XX. Госэнергоиздат, Л.-М., 1933.
4. Безызвестных А. В. Решение задачи о теплообмене транзитной струи с водоворотом в прудах-охладителях. Тр. ГГИ, вып. 72, 1959.
5. Трубина Е. К. Водообмен между транзитным потоком и водоворотом при плановом расширении спокойных установившихся безнапорных потоков однородной жидкости. Изв. ВНИИГ, т. 65, 1960.
6. Трубина Е. К. Водообмен и потери энергии при внезапном расширении потока. Изв. ВНИИГ, т. 66, 1960.
7. Караушев А. В. Турбулентная диффузия и метод смешения. Труды НИУГУГМС, сер. IV, вып. 30, 1946.
8. Лятхер В. М. Термический расчет пруда-охладителя по времени пребывания воды в пределах пруда. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. I. Госэнергоиздат, М.-Л., 1961.
9. Востржел Г. В. К методике гидротермического расчета прудов-охладителей. Изв. ВНИИГ, т. 69, 1962.
10. Безызвестных А. В. Основные теоретические предпосылки и практика приближенного теплового моделирования водохранилищ-охладителей. Труды совещания по современным методам расчета и моделирования температурных полей водоемов. Гидрометеоздат, Л., 1966.
11. Соловьев А. Н. Анализ результатов натурных исследований гидротермического режима водоемов-охладителей. Труды совещания по современным методам расчета и моделирования температурных полей водоемов. Гидрометеоздат, Л., 1966.
12. Патрашев А. Н. Гидромеханика. Военмориздат, М., 1953.
13. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. Изд. АН УкрССР, Киев, 1957.
14. Ананян А. К. Движение жидкости на повороте водовода. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1957.
15. Винников С. Д. О средних скоростях в круговом цилиндрическом водовороте. См. наст. сб.
16. Потапов М. В. Сочинения, т. II. Сельхозиздат, М., 1951.
17. Маккавеев В. М. О движении руслового потока и об общих вопросах турбулентного движения жидкости. Труды IV гидрологической конференции балтийских стран, Л., 1933.
18. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометеоздат, Л., 1960.

К ВОПРОСУ О ПОСТРОЕНИИ КРИВОЙ ПАДЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ВДОЛЬ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВОДОХРАНИЛИЩА-ОХЛАДИТЕЛЯ

Основной задачей существующего метода расчета термического режима водохранилищ-охладителей является определение площади активной зоны водохранилища. При отсутствии притока речной воды и расхода воды на сброс в нижний бьеф водохранилища площадь активной зоны водохранилища-охладителя может быть определена по формуле, рекомендуемой «Техническими указаниями к расчету прудов-охладителей»,

$$Q_{\text{акт}} = Q \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{Ae_m + Bt + \Delta I - N_1}, \quad (1)$$

где A и B — коэффициенты соответственно теплоотдачи испарением ($\text{тккал/м}^2 \text{ сутки мм}$) и конвекцией ($\text{тккал/м}^2 \text{ сутки град}$);

e_m и e'_m — максимальные упругости водяного пара соответственно для средней t и нормально естественной t_e температур воды, мм ;

ΔI — дополнительное эффективное излучение водной поверхности, $\text{тккал/м}^2 \text{ сутки}$;

$$N_1 = Ae'_m + Bt_e.$$

В таком виде уравнение (1) непосредственным интегрированием не решается, решение его, как указывается в ТУ 1963 г., выполняется методом конечных разностей.

Ниже излагается способ интегрирования выражения (1), основанный на упрощении подынтегрального выражения путем введения ряда общепринятых зависимостей. Подынтегральное выражение для зависимости (1) можно преобразовать с помощью введения формул связи максимальной упругости водяного пара и температуры.

Как известно, для достаточно большого диапазона температур (от 0 до 35°C) зависимость упругости водяного пара от температуры при постоянном давлении вполне удовлетворительно аппроксимируется параболой

$$e_m = 0,0234 t^2 + 0,175 t + 4,86. \quad (2)$$

Используя зависимость (2), а также определяя ΔI по формуле

$$\Delta I = (0,001 t_e + 0,086) (t - t_e), \quad (3)$$

запишем уравнение (1) в следующем виде:

$$\Omega_{\text{акт}} = Q \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{0,0234(t-t_e)^2 + (t-t_e)[t_e(0,0468A + 0,001) + 0,655(A + 0,13)]} \quad (4)$$

[уравнения (1) и (4) записаны для $c\gamma = 1 \text{ ткал/м}^3\text{град}$]. Далее введем обозначение $\delta = t - t_e$, где t — средняя температура воды на любом участке транзитной струи, t_e — нормально естественная температура. Тогда интеграл (4) можем записать в следующем виде:

$$\int_{\delta_2}^{\delta_1} \frac{d\delta}{a\delta^2 + b\delta}, \quad (5)$$

где $a = 0,0234 A$;

$b = t_e(0,0468 A + 0,001) + 0,655(A + 0,13)$;

$\delta_1 = t_1 - t_e$;

$\delta_2 = t_2 - t_e$; (t_1 и t_2 — последовательные значения температур на любом участке кривой падения температуры воды вдоль активной зоны водохранилища).

Решение интеграла (5) имеем в виде

$$\frac{\delta_1(a\delta_2 + b)}{\delta_2(a\delta_1 + b)} = e^{w_{уд}b}. \quad (6)$$

Аппроксимация (2) справедлива, как отмечалось, для широкого диапазона температур. Амплитуда изменения температур для водохранилища-охладителя, особенно в летний период, гораздо меньше. Принимая пределы изменения температуры вдоль активной зоны водохранилища в виде

$$t_{\text{сбр}} \geq t \geq t_e,$$

или

$$t \leq t_{\text{сбр}} - t_e,$$

мы можем воспользоваться зависимостью упругости пара от температуры линейного вида, которая является достаточно точной для малого диапазона разности $t_{\text{сбр}} - t_e$ (для водохранилищ-охладителей в летний период этот диапазон равен $12 \div 15^\circ\text{C}$):

$$e_m = ct + d. \quad (7)$$

Представляя зависимость упругости водяного пара от температуры в виде линейной функции $e_m = ct + d$, коэффициенты c и d определяем из условия равенства средних значений функций (2) и (7) для данного диапазона. Тогда зависимость (7) будет иметь вид

$$e_m = [0,175 + 0,0234(t_{\text{сбр}} - t_e)]t + 4,86 - 0,039(t_{\text{сбр}} + t_e) - 0,0078 t_{\text{сбр}} t_e. \quad (8)$$

С использованием зависимости (8) интеграл (4) запишется в виде:

$$\Omega_{\text{акт}} = Q \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{[(0,0234 t_{\text{сбр}} + 0,0234 t_e + 0,655)A + (0,001 t_e + 0,086)]}. \quad (9)$$

Вновь вводя обозначение $\delta = t - t_e$ и интегрируя от $\delta_1 = t_1 - t_e$ до $\delta_2 = t_2 - t_e$, получим

$$\int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{D(t-t_e)} = \int_{\delta_2}^{\delta_1} \frac{d\delta}{D\delta},$$

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = e^{w_{уд} D}. \quad (10)$$

Полученные зависимости (6) и (10) могут быть использованы для определения ряда заданных величин общей площади и удельной площади активной зоны водохранилища-охладителя.

Для проверки выведенных расчетных формул произведены сопоставительные расчеты по номограмме для теплового расчета прудов-охладителей (ТУ 1963 г., рис. V.13) и по формулам (6) и (10). Результаты расчета в обоих случаях дают хорошее совпадение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические указания к расчету прудов-охладителей. Госэнергоиздат, М., 1963.

С. Д. ВИННИКОВ, Т. Н. ЮРОВСКАЯ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩА-ОХЛАДИТЕЛЯ МОЛДАВСКОЙ ГРЭС

Большие объемы технической воды, необходимые на охлаждение конденсаторов паровых турбин современных тепловых электростанций, в большинстве случаев исключают возможность прямоточного водоснабжения ТЭЦ. Этим объясняется широкое применение в настоящее время для осуществления технического водоснабжения крупных ТЭЦ обратной схемы с водохранилищами-охладителями или градирнями. Следует отметить также, что наибольшее распространение получили водохранилища-охладители, так как метод водоснабжения по оборотной схеме с градирнями более сложен в эксплуатации и требует большего расхода электроэнергии на водооборот.

Тепловой расчет водохранилищ-охладителей производится по методу, разработанному еще в 1931 г. Н. М. Бернадским [1]. Этот расчет сводится к определению температуры воды, забираемой из водохранилища. В основу расчета, как известно, положено уравнение теплового баланса водохранилища-охладителя, которое записывается в следующем виде:

$$S_1 - S_2 = [A(e_m - e) + B(kt_{cp} - \theta) - R + \Delta I] \Omega_{акт}, \quad (1)$$

Для проведения расчета по этому уравнению необходимо знать площадь пруда $\Omega_{акт}$, с которой происходят основные потери тепла за счет теплоотдачи в атмосферу. Площадь пруда $\Omega_{акт}$ определяется расчетным путем или путем модельных исследований. С целью подтверждения расчетных данных и разработки новых, более точных методов расчета, проводятся натурные исследования.

Натурные исследования на Молдавской ГРЭС, проведенные сотрудниками ЛГМИ и ЮжОРГРЭС в 1966 г., были выполнены для проведения проверочных расчетов в связи с растущей мощностью ГРЭС.

Схема технического водоснабжения Молдавской ГРЭС. Молдавская ГРЭС обеспечивается водой из водохранилища-охладителя, образованного в результате возведения плотины в южной части Кучурганского лимана. Водохранилище пополняется за счет паводочных вод р. Днестра. В целях охлаждения сбросных вод ГРЭС в настоящее время используется только южная часть водохранилища (рис. 1). Водохранилище в значительной степени заросло как полупогруженной, так и погруженной растительностью.

Циркуляционные насосы подают воду из ковша, который находится в конце небольшого водоподводящего канала. Нагретая на ГРЭС

вода, пройдя закрытым водоводом по территории станции, попадает через сифонный колодец в открытый водоотводящий канал. Расход в сбросном канале во время проведения натуральных наблюдений составлял $15,1 \text{ м}^3/\text{сек}$.

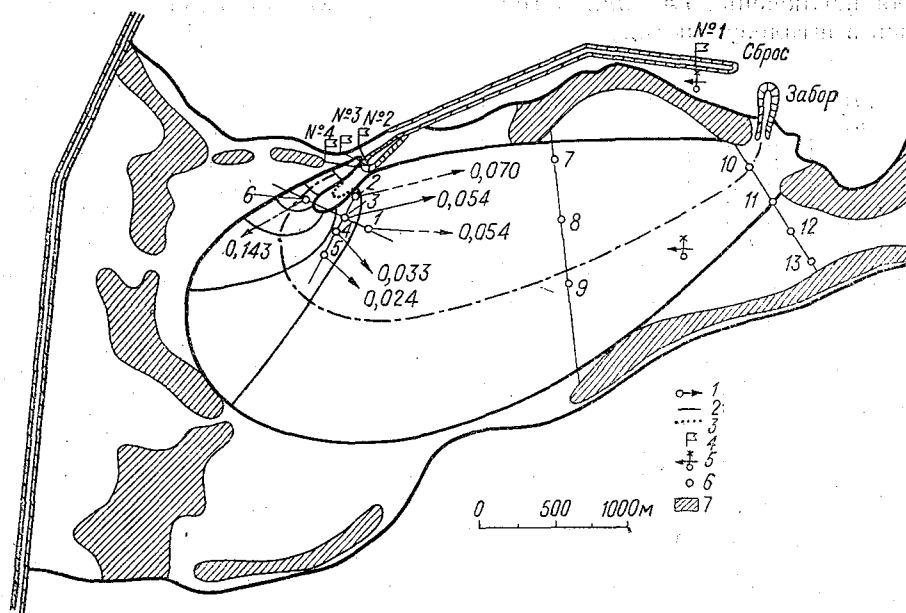


Рис. 1. Сопоставление расчетного и натурального планов течений в водохранилище-охладителе Молдавской ГРЭС:

1 — скорость (м/сек), 2 — граница транзитной струи по измерениям, 3 — по расчету, 4 — гидроствор, 5 — метеопост, 6 — место измерения скорости, 7 — растительность

Состав натуральных наблюдений на водохранилище. В состав натуральных наблюдений на водохранилище-охладителе Молдавской ГРЭС входили следующие работы:

1) комплекс геодезических работ (разбивка поперечников, закрепление точек наблюдений буйками, привязка к основной геодезической сети и т. д.);

2) комплекс гидрометеорологических наблюдений (наблюдения велись на береговом метеопосту и пункте, расположенном в центре водохранилища);

3) комплекс гидравлических исследований (измерение скоростей и направлений течения).

Гидравлические исследования. Для измерения скоростей и направлений течения на акватории водохранилища было разбито четыре поперечника, на которых буйками закреплены 13 точек наблюдений. Выбор направления поперечников — створов наблюдений — производился на основе регистрации траекторий движения поверхностных поплавков на бетонной модели водохранилища, сооруженной на его берегу. С целью более точного установления границ водоворота в районе струенаправляющей дамбы разбиты два взаимно-перпендикулярных поперечника. На выходе транзитной струи из сбросного канала проведены измерения глубин на трех промерных створах.

Измерения скоростей течения в закрепленных точках производились вертушкой ГР-42. Направление течения определялось по компасу, смонтированному на корпусе вертушки. Одновременно в некоторых точках скорости измерялись также и глубинными поплавками. (По-

плавок представлял собой бутылку, привязанную капроновой нитью к полому пластмассовому шарiku, причем бутылка заполнялась водой настолько, чтобы обеспечивалась ее плавучесть.)

Результаты измерения скоростей течения представлены на рис. 2. Для исключения влияния ветра на измерения наблюдения производились в штилевую погоду.

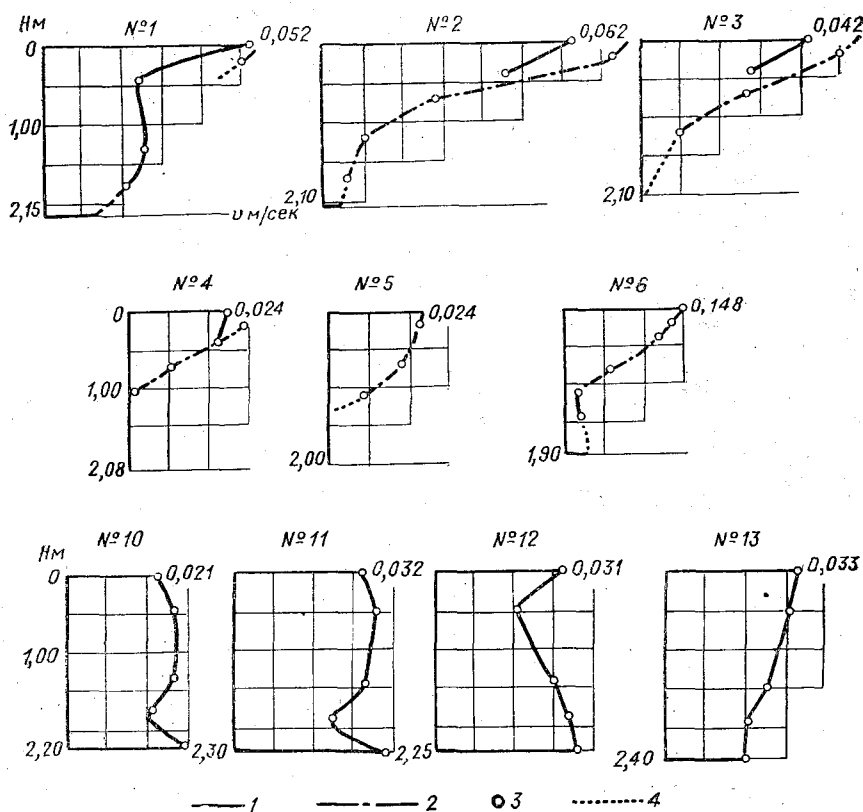


Рис. 2. Распределение скоростей по глубине в различных точках водохранилища на вертикалях № 1—№ 6; № 10—№ 13:

1 — скорости, измеренные вертушкой, 2 — скорости, измеренные поплавками, 3 — точки измерения, 4 — экстраполированные участки

По данным значений скоростей, полученных при измерении вертушкой и поплавком, можно сделать заключение, что чувствительность вертушки применительно к условиям водохранилища-охладителя Молдавской ГРЭС оказалась очень низкой (всего лишь 3 см/сек). Следует также отметить, что при скоростях течения, меньших 3—4 см/сек, вертушка нечувствительна к направлению потока, что, по-видимому, обусловлено небольшими размерами ее хвостового оперения.

Результаты измерений позволяют судить о том, что поток после выхода из сбросного канала сразу же поворачивает влево. Этот факт согласуется также с характером ложа водохранилища, данные о котором были получены по промерам, проведенным на трех створах на выходе из канала. Кроме того, резкий поворот (растекание струи) происходит и вследствие того, что при движении на этом участке вода испытывает повышенное сопротивление из-за наличия внутриводной ра-

стительности. Растекание струи имеет место в основном в поверхностном слое толщиной $0,5H$ (H — полная глубина потока), о чем свидетельствуют эпюры измеренных скоростей.

В центре водохранилища (рис. 1, точки № 7—9) скорости течения настолько малы, что не были зафиксированы даже с помощью поплавков. Данных о течениях воды в точках № 10—13, относящихся к периоду штиля, получить не удалось вследствие неустойчивого характера погоды. В этих точках скорости течения были измерены только в период ветренной погоды.

План течений в водохранилище-охладителе Молдавской ГРЭС. По данным измерений скоростей и направлений течения был построен план течений водохранилища-охладителя Молдавской ГРЭС. Одновременно построен план течений на основе теоретического расчета, рекомендуемого ТУ 1963 г. Это построение выполнено с целью проверки возможности применения расчетного метода для условий данного водохранилища. Результаты построения планов течений представлены на рис. 1. Теоретический расчет производился для расхода воды $Q = 15,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ при следующих данных в начальном сечении: ширина струи $b_0 = 50 \text{ м}$, средняя глубина $h_0 = 1,3 \text{ м}$, средняя скорость $v_0 = 0,22 \text{ м/сек}$. Коэффициент шероховатости n принимался переменным по длине струи ($n = 0,02 \div 0,03$ в соответствии со степенью зарастаемости (n увеличивается в направлении течения)).

Радиус закругления транзитной струи, полученный в результате построения плана течений расчетным методом, проверялся по формуле, выражающей условие поперечного равновесия струи

$$I = \frac{v_{\text{ср}}^2}{gr}, \quad (2)$$

где I — поперечный уклон;

$v_{\text{ср}}$ — средняя скорость;

r — радиус закругления струи;

g — ускорение силы тяжести.

В результате сопоставления планов сделаны следующие выводы. План течений в водохранилище-охладителе, установленный теоретическим методом, подтверждается общей картиной течений, полученной на основе обработки данных натурных наблюдений. При этом существенным фактором при расчетном методе является правильность назначения коэффициента шероховатости n . Полученный план течений свидетельствует о том, что водоворотная зона в районе струенаправляющей дамбы имеет сравнительно небольшие размеры. Таким образом, благодаря большому весу площади транзитной струи в общей площади активной зоны водохранилища можно судить о достаточно интенсивном охлаждении сбрасываемых вод Молдавской ГРЭС.

1969-88

РАЗДЕЛ II

ГИДРАВЛИКА И ДИНАМИКА РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

Н. Б. БАРЫШНИКОВ

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОЙМЫ НА ТРАНСПОРТ НАНОСОВ В ОСНОВНОМ РУСЛЕ¹ (экспериментальная работа)

Результаты, достигнутые при изучении вопросов взаимодействия руслового и пойменного потоков [4, 6, 8 и др.], позволяют поставить вопрос о влиянии эффекта турбулентного взаимодействия на транспорт наносов в руслах с поймами. Если вопросы транспорта наносов в призматических потоках прямоугольного сечения изучались на протяжении нескольких десятилетий и в этом направлении достигнуты значительные результаты [3, 5 и др.], то вопросы применимости разработанных теорий транспорта наносов к сложно-составным руслам, частным случаем которых являются пойменные, изучены недостаточно. Действительно, кроме работ В. Н. Гончарова [3], В. С. Алтунина, Г. В. Железнякова (1967) и исследования автора [1], выполненного на модели русла с односторонней гладкой поймой, какие-либо опубликованные материалы по этому вопросу отсутствуют.

Итоги работы автора [1], основанные на данных 76 опытов в русле с гладкой поймой, могут быть кратко сведены к следующим положениям:

1. Расходы наносов в русловом отсеке резко снижаются при выходе потока на пойму.
2. При равномерном режиме потока кривые зависимости $G_p(Q_p)$ и $G_p(H_p)$ имеют перелом при выходе воды на пойму. При этом уменьшение расходов наносов достигает величины 50% и более.
3. Кривые зависимости $G_p(v_p)$ близки к однозначным как для изолированного, так и для взаимодействующих русел.
4. Наиболее близкие к экспериментальным получают расчетные величины по формулам, в которых основным расчетным параметром является скорость потока. В частности, анализ расчетов произведенных по четырем формулам (В. Н. Гончарова, И. И. Леви, Г. И. Шамова и А. Ш. Барекяна) позволил рекомендовать формулу Гончарова [3] для расчета транспорта наносов в русловых потоках как изолированных, так и взаимодействующих с поймой.

Перед нами стояла задача выяснения влияния шероховатости поймы на транспорт наносов русловым потоком. С этой целью в лаборатории было выполнено свыше 100 опытов в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном.

Методика подготовки и проведения опытов

В гидравлическом лотке длиной 3 м и шириной 0,4 м было смонтировано русло с поймой. Ширина русла 19 см, ширина поймы 21 см. ✓

¹ Расчеты и построение графических зависимостей по второй части работы, частично выполнены В. Бузиным.

Такое соотношение ширины русла и поймы обусловлено выводами работы И. П. Спицына [7], полученными по экспериментальным данным, о том, что тормозящее воздействие поймы распространяется на всю ширину руслового отсека. В то же время автором [2] по данным наблюдений на реках Амуре, Птичь и других установлено, что тормозящее воздействие поймы распространяется на 60—100% ширины русла. Исходя из этих соображений, размеров лотка и стремления максимально возможно исключить влияние эффекта пространственности и было принято соотношение между шириной русла и поймы, близкое к единице.

В большинстве экспериментов (серии XI—XVII) применялись смеси с постоянными значениями средней и пятипроцентной крупностей наносов. В процессе экспериментов измерялись следующие параметры: скорости течения (трубками Пито—Дарси), глубины, уровни и уклоны свободной поверхности (тастерами и лабораторным нивелиром). Расходы воды определялись как по водосливу, так и гидрометрическим способом, а расходы наносов — весовым способом.

Для уменьшения влияния условий входа и выхода воды с установки применялись жалюзи, регулировкой которых достигалось постоянство глубин по длине потока в начальный период.

Совершенно очевидно, что несмотря на принятые меры, режим потока на установке длиной 3 м может быть лишь близким к равномерному, поэтому при дальнейшем анализе это учитывалось и производилась дополнительная оценка надежности эмпирических данных посредством их увязки по кривым $Q_p(H)$ и $v_p(H)$.

Второе затруднение связано с измерением расходов наносов. По всей длине руслового отсека формировалось дно из уплотненного мокрого песка толщиной 3 см. Для предотвращения смыва в период регулирования расхода воды дно руслового отсека установки покрывалось резиновым листом, на котором устанавливались тяжести. В конце руслового отсека сделан жесткий порог высотой 3 см. Эксперименты выполнялись при пяти различных шероховатостях поймы (табл. 1).

Таблица 1

Данные экспериментов

Серия опыта	№ опыта	$k_{п}, см$	Уклон свободной поверхности, ‰	Средняя крупность наносов, мм	Наибольшие значения					
					$H_p, см$	$H_{п}, см$	$Q, л/сек$	$v_p, м/сек$	$v_{п}, м/сек$	$G_p, г/сек$
VIII	1—14	1,5	6	1,14	11,0	4,0	17,2	0,77	0,67	23,6
IX	1—17	1,5	9	1,14	10,4	5,2	15,4	0,80	0,50	23,8
X	1—19	1,5	3	1,92	13,0	7,0	16,6	0,66	0,48	15,8
XI	1—23	—	3—9	1,89	11,0	—	21,8	1,02	—	32,0
XII	1—7	1,0	6	1,89	13,0	8,0	28,0	0,77	0,62	15,2
XIII	1—8	1,0	3	1,89	10,5	6,0	19,4	0,70	0,60	14,5
XIV	1—7	1,0	9	1,89	11,0	6,2	23,4	0,80	0,66	21,3
XV	1—18	0,5	3—9	1,89	11,0	6,5	21,1	0,90	0,72	33,1
XVI	1—16	2,0	3—9	1,89	12,5	5,8	25,0	0,76	0,57	19,5
XVII	1—12	3,0	3—9	1,89	12,2	5,0	22,8	0,66	0,57	15,6

Пойма была выполнена из дерева и покрыта картоном горячего прессования, предварительно покрашенного нитрокраской. Шероховатость наносилась на пойму с помощью нитролака. Расстояния между частицами шероховатости крупностью k на пойме равнялись одной-двум крупностям частиц, т. е. частицы наносились почти вплотную. Изоляция руслового отсека от пойменного осуществлялась с помощью стеклянной стенки толщиной 6 мм, установленной по всей длине лотка.

Анализ экспериментальных данных

В результате анализа установлено, что данные опытов серий VIII и IX, выполненных при средней крупности наносов 1,14 мм (табл. 1), существенно отклоняются от данных остальных серий опытов и поэтому не могут быть использованы для выяснения влияния шероховатости поймы¹ на транспорт наносов в основном русле.

Серия X выполнена при шероховатости поймы 1,5 см и только при одном значении уклона свободной поверхности, равном 3‰. При этом пятипроцентная крупность наносов (k_5), принятая В. Н. Гончаровым [3], А. Ш. Барекьяном и другими авторами для характеристики сопротивления дна, существенно отличается от соответствующей крупности наносов в остальных сериях (XI—XVII) опытов. Исходя из этого, все расчеты произведены по данным серий XI—XVII, а данные серий VIII—X привлекались при выяснении качественного влияния отдельных параметров.

Учитывая, что все эксперименты выполнены в лотке длиной только 3 м, для проверки надежности исходных данных была произведена их увязка путем построения кривых $Q_p(H)$ и $v_p(H)$. В процессе такого анализа установлено, что в опытах 22 и 23 серии XI получены существенные отклонения экспериментальных данных от расчетных кривых, вызванные, по-видимому, неравномерным режимом движения воды на установке.

По данным серий XI—XVIII опытов были построены графические зависимости $G_p(H)$ и $G_p(Q_p)$ как для изолированного от поймы русла, так и для руслового отсека, взаимодействующего с поймой, имеющей различную шероховатость (рис. 1).

Как видно на рис. 1, кривые $G_p(H)$ и $G_p(Q_p)$, соответствующие различным шероховатостям поймы, образуют самостоятельные ветви, расположенные влево от кривых изолированного русла. Указанное отклонение ветвей кривых возрастает с увеличением шероховатости поймы. В пределах амплитуды, освещенной данными измерений, сходимости кривых, соответствующих пойменному руслу, с кривой изолированного русла не обнаружено.

Несколько отличные результаты получены при построении и анализе кривых $G_p(v_p)$ (рис. 2). На этих графиках точки, соответствующие данным экспериментальных наблюдений, образуют полосу, внутри которой можно провести осредненную кривую. При этом отклонения экспериментальных данных от расчетной кривой $G_p(v_p)$ находятся в пределах точности измерений $\left(\frac{\Delta G}{G} \leq 20\%\right)$. В то же время при всех трех измеренных уклонах прослеживается четко выраженная закономерность, а именно отклонения экспериментальных данных, соответ-

¹ В дальнейшем под шероховатостью поймы условно принят средний диаметр частиц, слагающих пойму.

«ствующих пойменным руслам, значительно больше, чем отклонения данных, соответствующих изолированным. Знак этих отклонений в нижних частях кривых переменный, т. е. наблюдаются отклонения как

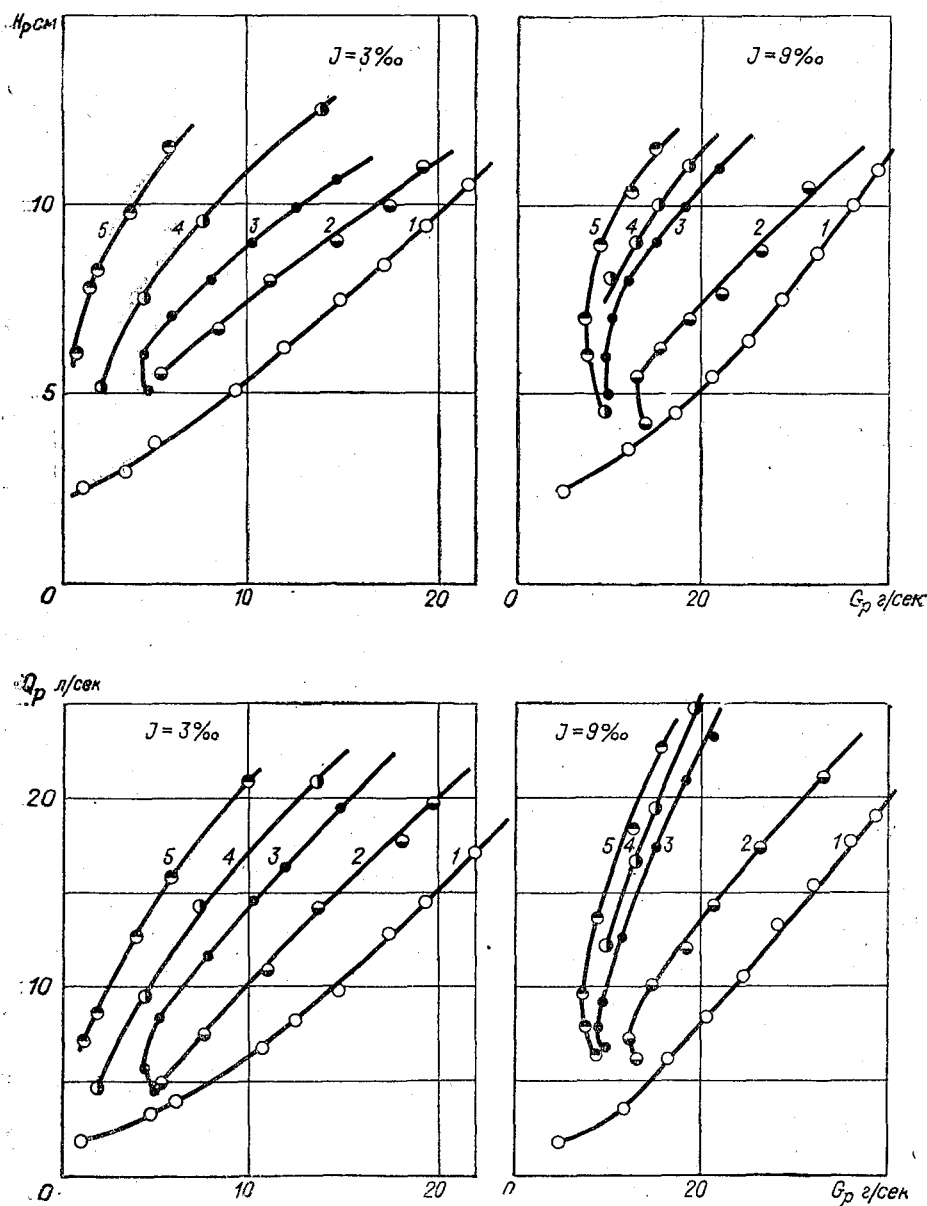


Рис. 1. Кривые зависимости $G_p = f(H_p)$ и $G_p = f(Q_p)$:

1 — изолированное русло; 2, 3, 4, 5 — русло, взаимодействующее с поймой, шероховатостью 0,5; 1; 2 и 3 см

влево, так и вправо от кривой изолированного русла. В верхних частях кривых исходные данные, соответствующие пойменным руслам, как правило, отклоняются вправо от расчетной кривой изолированного русла. Это положение частично можно объяснить более низкой точностью определения скоростей при работе пойменных русел. Действительно, измерение скоростей в них производилось гидрометрическим

способом, в то время как в изолированных руслах производилось одновременное измерение как гидрометрическим способом, так и по водосливу.

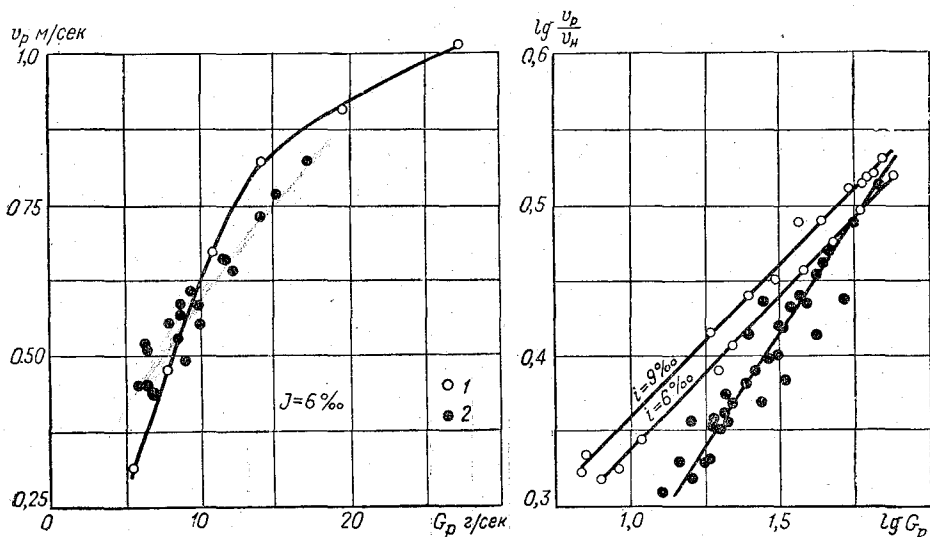


Рис. 2. Кривые зависимости $G_p = f(v_p)$:
1 — изолированное русло; 2 — русло, взаимодействующее с поймой

Анализ графических зависимостей (см. рис. 2)

$$G_p = f\left(\frac{v_p}{v_n}\right),$$

где v_p и v_n — средняя и неподвижная средняя скорости потока в русле, указывает на наличие определенной закономерности.

Зависимости $G_p = f\left(\frac{v_p}{v_n}\right)$ в первом приближении могут быть приняты линейными:

$$\lg G_p = \alpha \lg \frac{v_p}{v_n} + \beta, \quad (1)$$

где α — параметр, соответствующий тангенсу угла наклона прямых.

В то же время α — показатель степени при $\frac{v_p}{v_n}$ в аппроксимированном уравнении транспорта, по В. Н. Гончарову [3]

$$G_p = 1,2(1 + \varphi) v_n k \left(\frac{v_p}{v_n}\right)^{4,33}, \quad (2)$$

β — параметр, зависящий от крупности частиц, слагающих русло, глубины, неподвижной скорости и других факторов, численно равен отрезку на оси G_p (рис. 2), отсекаемому расчетными прямыми.

Уравнение (1) может быть преобразовано к виду

$$G_p = \beta \left(\frac{v_p}{v_n}\right)^\alpha.$$

Как видно на рис. 2, углы наклона расчетных прямых, соответствующих изолированному руслу, отличны от аналогичных для пойменных русел, а следовательно, различны и значения параметра α .

Учитывая, что разброс точек, соответствующих данным наблюдений, велик, приближенные значения параметра α для условий транспорта наносов в русле, взаимодействующем как с гладкой, так и с шероховатой поймами, может быть принято равным $3,0 \pm 0,5$, а соответствующее значение α для изолированного от поймы потока составляет $4,62 \pm 0,2$. Последнее значение параметра α близко к рекомендованному Гончаровым [3].

В. Н. Гончаров, как известно, по данным многочисленных экспериментов, выполненных в широком диапазоне изменения параметров, определяющих величину расхода наносов, получил $\alpha = 4,33$.

Далее, расчеты, выполненные автором по данным опытов, произведенных в русле с гладкой поймой [1], указывают, что при подсчете расходов наносов по формулам Гончарова и Шамова средние квадратичные отклонения расчетных величин от экспериментальных для русла с поймой на 25% (по формуле Гончарова) и на 80% (по формуле Шамова) больше, чем для изолированного русла. Объяснением этого положения, по-видимому, является деформация поля скоростей руслового потока, происходящая под воздействием пойменного. Эта деформация приводит к выравниванию профиля скоростей по глубине, а следовательно, к изменению соотношения между донной (u_Δ) и средней на вертикали скоростями потока и соответственно между осредненной донной и средней скоростью всего потока. В то же время в основу приведенных выше формул Гончарова, Шамова и других авторов, в которых расход наносов пропорционален средней скорости потока, положено предположение о том, что между донной и средней скоростями существует соотношение, определяемое расчетным профилем скоростей. Так, у Гончарова и Шамова, за основу принят логарифмический профиль скоростей, а у Караушева — эллиптический.

Как различие параметров α для изолированных и пойменных русел, так и существенное увеличение ошибки расчетов по указанным формулам для пойменных русел по сравнению с изолированными нельзя объяснить только точностью экспериментальных данных, по-видимому, эти отклонения объясняются изменением механизма потока, возникающего под воздействием эффекта турбулентного взаимодействия.

Одной из гипотез, объясняющих причины этих отклонений, является предположение о том, что распределение скоростей по глубине руслового потока в результате воздействия на него пойменного существенно отклоняется от логарифмического (эллиптического и др.).

Следовательно, принятое Гончаровым, а также Шамовым и другими авторами соотношение между донной (u_Δ) и средней скоростями

плоского потока
$$\frac{u_\Delta}{v} = \frac{1,25}{\lg \frac{6,15H}{\Delta}}$$
 положенное им в основу расчетной

формулы для подсчета расхода наносов [2], должно быть заменено другим, отличным от логарифмического.

Эффект турбулентного взаимодействия потоков особенно значительное влияние, видимо, оказывает на величину соотношения донной и средней неразмывающихся скоростей. Этот факт, помимо влияния на величину расхода наносов, имеет существенное практическое значение

при расчете русловых деформаций, так как в большинстве руководств в качестве нормативов рекомендуется не значение донной, а именно значение средней неразрывающей скорости.

Аналогичное указанному отклонение от расчетного (логарифмического, параболического и др.) профиля скоростей наблюдается при «пространственном» режиме, когда происходит трансформация скоростной эпюры в сторону выравнивания и существенный рост донных скоростей по сравнению с расчетными (подробно этот вопрос изложен у Гончарова). В частности, учет влияния эффекта пространственности Гончаров производит грубо приближенно, посредством введения в уравнение транспорта постоянного коэффициента, равного 1,76. Тогда уравнение (2) может быть представлено в виде

$$G = 2,11 (1 + \varphi) v_n k \left(\frac{v}{v_n} \right)^{4,33}.$$

Для выяснения правильности приведенной гипотезы были использованы данные опытов И. П. Спицына, выполненные в лаборатории ЛГМИ. В русловом лотке была смонтирована модель русла с односторонней поймой. Ширина русла на модели 40 см, ширина поймы 206 см при прямоугольном сечении русла и 166 см при других формах сечения.

Пойма во всех опытах была прямоугольная, а русло — прямоугольное, треугольное, трапецидальное и параболическое. Опыты выполнялись при различной шероховатости русла (0,16; 1,5 и 2,0 мм). Шероховатость поймы во всех опытах была постоянной (3,5 мм).

По данным опытов для различных форм сечений, наполнений и шероховатости как изолированных, так и взаимодействующих с поймой

русел были выполнены расчеты параметра $k_r = \frac{u_\Delta}{v}$. Для русла прямоугольного сечения были также вычислены осредненные по ширине русла значения $k_{ср.г}$ и значение k_r по формуле Гончарова $k_r = \frac{u_\Delta}{v} =$

$$= \frac{1,25}{\lg \frac{6,15H}{\Delta}} \quad \text{для каждого наполнения. По этим данным были построены}$$

зависимости $k_{ср.г} = f(H, \Delta)$ (рис. 3). Кроме того, для русла прямоугольного сечения построены эпюры распределения параметра k_r по ширине как изолированного, так и взаимодействующего с поймой русел (рис. 4).

К сожалению, исходные данные в значительной мере относились к условиям пространственного режима, когда происходит деформация скоростного поля и существенны отклонения от логарифмического распределения. Этот фактор необходимо учитывать при анализе, так как для пространственного режима эпюра скоростей более выровнена по глубине. Действительно, расчетные по логарифмическому профилю кривые зависимости параметра $\bar{k}_r = \frac{1,25}{\lg \frac{6,15H}{\Delta}} = f(H, \Delta)$ располагаются

значительно правее соответствующих кривых, полученных по экспериментальным данным. В то же время последние находятся в близком соответствии как для изолированного, так и для взаимодействующего с поймой русловых отсеков. Расхождения находятся в пределах точности измерений.

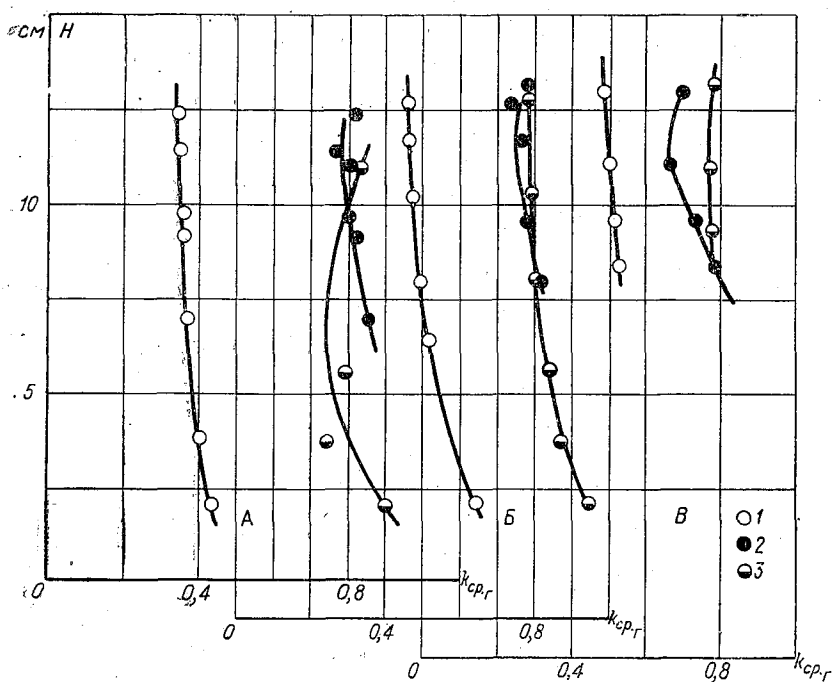


Рис. 3. Кривые зависимости $k_{cp,r} = f(H)$:

1 — расчетные значения по формуле В. Н. Гончарова; 2 — экспериментальные для изолированного русла; 3 — экспериментальные для взаимодействующего с поймой русла. А — шероховатость русла 0,16 мм; Б — шероховатость русла 1,4 мм; В — шероховатость русла 2,0 мм

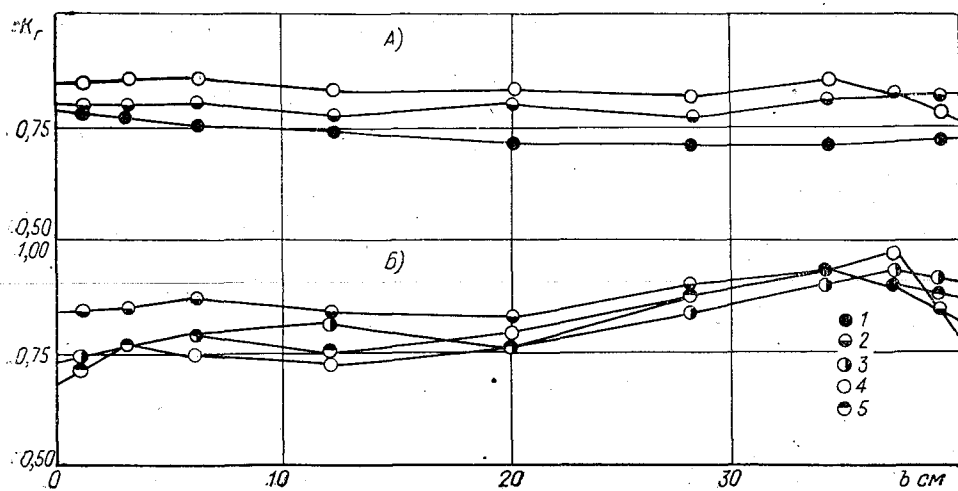


Рис. 4. Кривые распределения параметра k_r по ширине русла:

А — изолированное русло, Б — русло, взаимодействующее с поймой. 1 — $H_p = 5,0$ см, 2 — $H_p = 6,5$ см, 3 — $H_p = 10,0$ см, 4 — $H_p = 11$ см, 5 — $H_p = 12,5$ см

Анализ графиков распределения параметра k_r по ширине русла позволяет сделать следующие выводы.

1. Абсолютные значения параметра k_r как для изолированного, так и для взаимодействующего с поймой русла находятся в близком соответствии. Наблюдаются отклонения при малых наполнениях (2 см), что можно объяснить низкой точностью измерений в этих условиях (малые скорости и глубины), а также тем фактом, что числа Re малы и поток находится в зоне переходного режима.

2. При наличии поймы происходит постепенное возрастание значения параметра k_r к границе раздела руслового и пойменного потоков (рис. 4). Максимум значений k_r находится на расстоянии 3—4 см от этой границы.

3. В изолированных руслах значение параметра k_r слабо изменяется по ширине, несколько возрастая в пристенных отсеках, что объясняется влиянием эффекта пространственности.

Эпюры распределения k_r по ширине сечения для русла с поймой (рис. 4) имеют некоторые общие черты. Здесь наблюдаются двухгорбые эпюры. Особенно высоких значений параметр k_r достигает на граничной между руслом и поймой вертикали. Это увеличение четко прослеживается на всех эпюрах пойменных русел. Именно здесь в припойменной области наблюдаются наибольшие градиенты продольной скорости и затрачивается наибольшее количество энергии на турбулентное взаимодействие руслового и пойменного потоков, в результате чего уменьшается значение поверхностных скоростей, эпюра выравнивается

и вследствие этого увеличивается величина отношения $\frac{u_\Delta}{v}$.

На графиках зависимостей $k_{ср.г} = f(H, \Delta)$ (рис. 3) изображены кривые, построенные на основании расчетов по формуле Гончарова и полученные эмпирическим путем. Анализ этих кривых позволяет сделать вывод о том, что с увеличением шероховатости русла наблюдается уменьшение эмпирических значений $k_{ср.г}$, что противоположно результатам расчетов по формуле Гончарова. Далее, абсолютные значения параметра $k_{ср.г}$ для пойменных русел, вычисленные по формуле Гончарова, примерно в два раза меньше эмпирических.

Несмотря на значительный объем материалов, использованных в данной работе, следует признать, что он недостаточен для обоснования окончательных выводов. Поэтому в настоящее время можно выполнить предварительное обобщение результатов и дать предварительные выводы с целью последующей их проверки по данным более широкого диапазона изменения исходных величин и особенно по данным натурных измерений.

Выводы

1. Для подсчета стока наносов на реках с поймой следует строить кривые зависимости $G_p(v_p)$ с кривыми $G_p(Q_p)$ и $G_p(H)$.

2. Падение расхода наносов основного русла при выходе воды на пойму тем больше, чем больше шероховатость поймы, а следовательно, и больше разность скоростей руслового и пойменного потоков.

3. Под влиянием пойменного потока в русле происходит деформация поля скоростей. Эпюра скоростей по глубине руслового потока выравнивается. Величина отношения донной скорости к средней отклоняется от расчетной по существующим формулам (логарифмической,

эллиптической, параболической и др.) в сторону увеличения. Это положение необходимо учитывать как при подсчете расходов наносов, так и при определении характера деформаций в потоках с поймой.

4. Расчетные значения средних неразмывающих и размывающих скоростей, получаемые по современным формулам, будут несколько завышены для пойменных русел и других составных сечений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б. Транспорт наносов в прямолинейных потоках с поймой. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
2. Барышников Н. Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
3. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
4. Железняков Г. В. Гидрометрия. Изд. «Колос», М., 1964.
5. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Гидрометеиздат, Л., 1966.
6. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел. Тр. ГГИ, вып. 128, 1965.
7. Спицын И. П. О механизме взаимодействия потоков основного русла и поймы. Тр. ЛГМИ, вып. 13, 1962.
8. Sellin R. H. I. A. Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and That over its Flood Plain. La Houille Blanche Revue Internationale de L'eau № 7, 1964.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ РУСЛА

Вопросы расчета пропускной способности русел различных форм сечений являются предметом исследований многих авторов [3, 4, 9 и др.]. Французский инженер Антуан Шези в 1775 г. предложил широкоизвестную в наше время формулу для расчета скоростей в виде $v = C \sqrt{Ri}$. А. Шези предполагал, что учет влияния формы сечения на величину средней скорости потока отражается гидравлическим радиусом, значение параметра C считал постоянным. Не останавливаясь на детальном анализе ряда предложений и формул раннего периода, ибо он произведен в работах Форхгеймера [9] и Горбачева [4], необходимо отметить исследование Дарси и Базена, пришедших к выводу о том, что скорости течения в полукруглом русле примерно на 10% больше, чем в прямоугольном или треугольном при тех же гидравлических радиусах. Это положение впоследствии было подтверждено рядом авторов [7, 9], в частности Куттером, который рекомендовал увеличить значение параметра C на 5—6 единиц для полукруглой формы сечения. Далее, ряд исследователей (Христен [4], Гончаров [3] и др.) указывают, что даже русла прямоугольной формы имеют различную пропускную способность при различных соотношениях ширины к глубине. При значениях указанного соотношения, меньших 6—10, происходит также и качественная трансформация поля скоростей.

Дальнейшее развитие этот вопрос получает в экспериментальных опытах Никурадзе в напорных трубах и Зегжда [6] в открытых каналах, посвященных исследованию зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

Наиболее фундаментальное изучение вопроса влияния формы сечения на пропускную способность русла выполнено Маастик [7], который после детального анализа отечественных и зарубежных исследований, а также данных собственных экспериментов пришел к ряду интересных выводов.

1. Закономерной зависимости сопротивления движению воды в открытых гладких руслах от формы сечения не обнаруживается.

2. В шероховатых руслах влияние формы сечения на коэффициент сопротивления увеличивается с возрастанием абсолютной шероховатости, а при постоянной шероховатости уменьшается с увеличением гидравлического радиуса потока.

3. Влияние формы сечения объясняется вторичными течениями.

Ряд авторов, в том числе В. Н. Гончаров, Г. В. Железняков [5] и М. А. Мостков [8], предлагают различные критерии учета влияния фор-

мы сечения на скорости или расходы воды. Так, Гончаров [3] рекомендует предложенный им критерий только для русел простых форм сечений (в первом приближении все сечения им подразделяются на простые и составные). По мнению Гончарова, увеличение скорости (расхода) тем больше, чем больше значение параметра r , величина этого увеличения по сравнению с потоком прямоугольного сечения характеризуется параметром

$$\beta = \frac{(1+r)^{1,67}}{1+1,67r},$$

где $r = \frac{H_{\text{макс}}}{H_{\text{ср}}} - 1$.

В то же время, рассматривая узкие потоки прямоугольного сечения, Гончаров совершенно справедливо указывает, что поля скоростей, а следовательно, и расходы воды потоков с соотношением ширины к глубине, меньшим 10, существенно отличны от аналогичных, режим которых близок к плоскому. И далее, элементарные расчеты, выполненные с учетом критерия β , показывают, что русла треугольной формы должны иметь большую пропускную способность, чем полукруглые, что не соответствует экспериментальным данным ряда авторов, в частности Базена и Куттера.

Таким образом, критерий Гончарова не может быть признан универсальным. Более приемлемым является критерий, предложенный Железняковым [5],

$$\beta_* = \frac{1}{\omega \sqrt{h_{\text{ср}}}} \int_0^B h^{3/2} db.$$

Однако и критерий β_* , названный параметром формы живого сечения, нельзя признать универсальным. Действительно, подсчитанные с учетом этого критерия расходы воды в руслах прямоугольного и треугольного сечений отличаются на 13%, что также не соответствует экспериментальным данным. Существенные отличия получаются и для русел других форм сечений.

М. А. Мостков [8] предложил производить учет формы сечения при помощи параметра

$$\delta = \frac{R}{V_{\omega}} = \frac{V_{\omega}}{\chi}.$$

По данным автора [8], только за счет изменения угла откоса канала трапециoidalной формы возможно увеличение его пропускной способности на 10—11%, что также не соответствует приведенным в литературе данным.

В последние годы появился ряд работ грузинских исследователей [1], в которых указывается на необходимость более тщательного учета влияния формы сечения на пропускную способность каналов.

В указанных выше работах приведены данные исследований, освещающие вопрос влияния формы сечения простого профиля. Как видно из приведенного краткого обзора имеющихся предложений, в настоящее время отсутствует универсальный критерий, учитывающий влияние простых форм сечения на пропускную способность русел.

Значительно сложнее вопрос учета влияния составных форм сечений (рис. 1) на средние скорости потока. Первые сведения по этому вопросу приведены в исследовании Форхгеймера [9]. «Если ложе состоит из нескольких сильно одно от другого разнящихся русел, движение в каждом русле совершается почти независимо от движения в остальном поперечном сечении». Он предлагал рассчитывать расход воды как сумму расходов его отдельных отсеков, отмечая при этом, что фактический расход будет меньше расчетного. Форхгеймер объяснял это появлением большого числа завихрений воды на границе раздела потоков, движущихся с различными скоростями. По исследованию Грантца [9], «... линия раздела между зонами большей и меньшей скорости стоит не вертикально, но имеет очертание приблизительно по продолжению линии откоса. Несмотря на это, общий расход воды меньше, чем следует по уравниению».

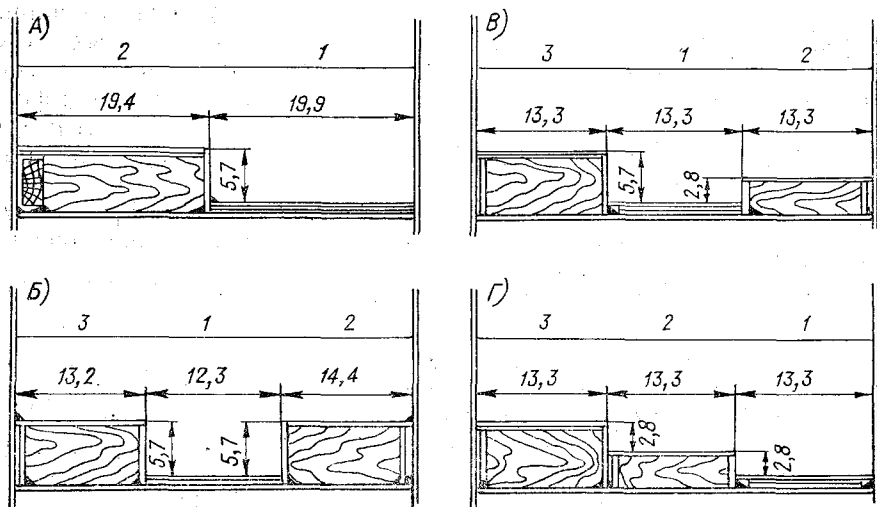


Рис. 1. Составные формы сечений, исследованные в экспериментах:
А, Б, В и Г — индексы серий

Последующие исследования тесно связаны с расчетом пропускной способности пойменных русел, являющихся частным случаем составных.

Состояние вопроса исследований взаимодействия руслового и пойменного потоков освещено в литературе [2, 3, 5 и др.] и, в частности, в работах одного из авторов данной статьи [2], где и приведены основные результаты разработок этого вопроса.

В гидравлической лаборатории института в экспериментальном плане была поставлена задача выяснения влияния формы составных сечений на их пропускную способность. В малом гидравлическом лотке (шириной 0,4 м) с переменным уклоном были смонтированы и последовательно исследованы четыре различных составных сечения (рис. 1). Учитывая, что рабочая длина установки составляла только 3 м, определение глубины равномерного режима было связано с большими затруднениями. Предварительно с помощью жалюзи, расположенных в конце установки, на ней достигался режим, возможно близкий к равномерному. Однако, как указывает Зегжда [6], даже при работе на установках большой длины при режимах, близких к равномерному, достижение нулевой разности глубин в граничных створах сопровождается

ся большим изменением глубин и очень затруднено. Поэтому для установления глубины равномерного режима был применен метод, разработанный Зегжда.

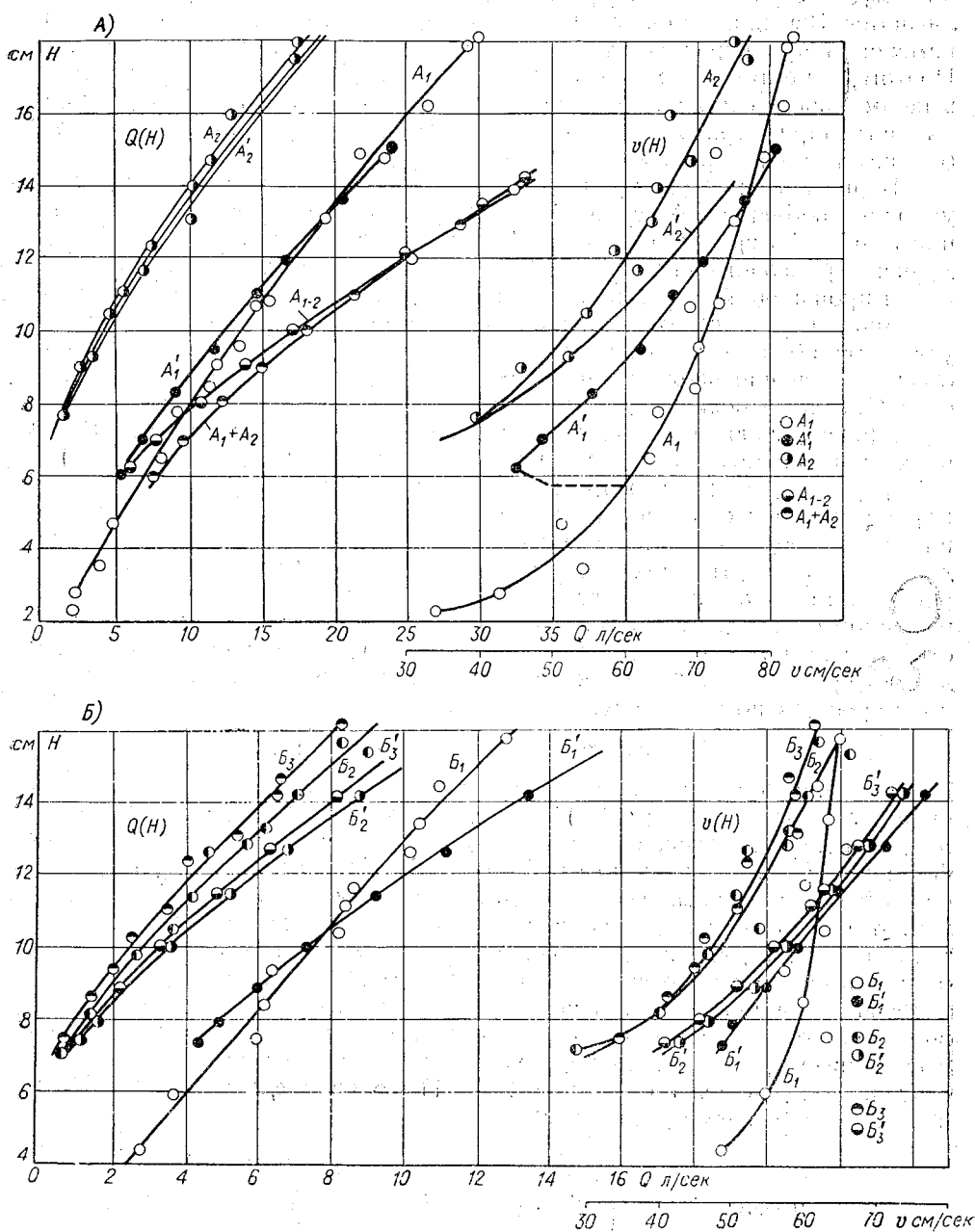


Рис. 2. Кривые зависимости Q (H) и v (H) для различных отсеков серий А и Б:

$A_{1,2}$ и $B_{1,2,3}$ — изолированные отсеки; $A'_{1,2}$ и $B'_{1,2,3}$ — взаимодействующие отсеки

В то же время, если правомерность и эффективность применения способа Зегжда к руслам простых форм не вызывает сомнений, то необходимо отнестись с большой осторожностью к его применению при

исследованиях механизма течения в составных, ступенчатых руслах. Уже Эгли [10] отмечал качественное различие влияния равномерного и неравномерного режимов в составных руслах. Следовательно, отыскание глубины равномерного режима по графику связи $h = f(\Delta h)$, предлагаемое Зегжда, одновременно является отрицанием качественных изменений при переходе от неравномерного к равномерному режиму. Поэтому, применяя метод Зегжда, мы стремились в каждом опыте максимально возможно осветить каждую связь результатами наблюдений над параметрами потока при режимах, по возможности наиболее близких к равномерному.

В экспериментах производились измерения уровней, глубин и уклонов свободной поверхности с помощью тастера и лабораторного нивелира. Измерение скоростей течений осуществлялось трубками Дарси, а расходов — гидрометрическим способом и по водосливу. Измерения производились как в составных руслах, так и в составляющих их изолированных отсеках. Для изоляции отсеков по всей длине модели устанавливалась стенка из стекла толщиной 5 мм. Таким образом она стесняла сечение изолированных отсеков и уменьшила их пропускную способность на величину, в пределе достигающую 3%.

Предварительно была произведена тарировка всех четырех русел и их изолированных отсеков и получены кривые зависимости $Q(H)$ и $v(H)$ (рис. 2). После этого в каждом из четырех русел произведено измерение полей скоростей при восьми различных наполнениях. Измерения производились в створе, расположенном на расстоянии 2 м от входа, на 25—30 вертикалях пятиточечным способом. Перед началом измерений в лотке устанавливался режим, по возможности близкий к равномерному. Контроль установления равномерности режима осуществлялся по ранее полученным кривым $Q(H)$. Обработка расходов воды осуществлялась графическим способом. Результат сопоставлялся с измеренным по водосливу.

Анализ экспериментальных данных

По данным всех четырех серий опытов были построены графические зависимости $v(R)$; $v(H)$ как для изолированных, так и для взаимодействующих отсеков. При этом для изолированных отсеков всех форм сечения получена самостоятельная кривая $v(R)$ (рис. 3). Точки, соответствующие экспериментальным данным, образуют полосу, ширина которой не превышает точности измерений. Резко отличные результаты получены для глубокого, в дальнейшем названного русловым, отсека при его взаимодействии с соседними. Действительно, экспериментальные данные существенно отклоняются влево от расчетной кривой изолированного русла и для каждой серии также образуют отдельные кривые (рис. 2). При этом уменьшение скоростей во взаимодействующем русловом потоке (отсек № 1) по сравнению с изолированным характеризуется данными табл. 1.

Таблица 1

Серия	$\left(\frac{\Delta v}{v_{из}}\right)_{ср} \%$	$\left(\frac{\Delta v}{v_{из}}\right)_{max} \%$
А	19,1	23,2
Б	18,8	20,7
В	23,5	27,3
Г	11,1 (20,8)	13,9 (26,6)

Как видно из данных этой таблицы, величина уменьшения пропускной способности руслового отсека при его взаимодействии с соседними при одном и том же значении гидравлического радиуса достигает 27% при среднем значении около 20%. В то же время для серий А, Б и В происходит некоторое увеличение средних скоростей в смежных взаимодействующих отсеках № 2 и 3, что является некоторой компенсацией уменьшения пропускной способности отсеков русла, однако это увеличение во всех исследуемых случаях не превышает 5—7%.

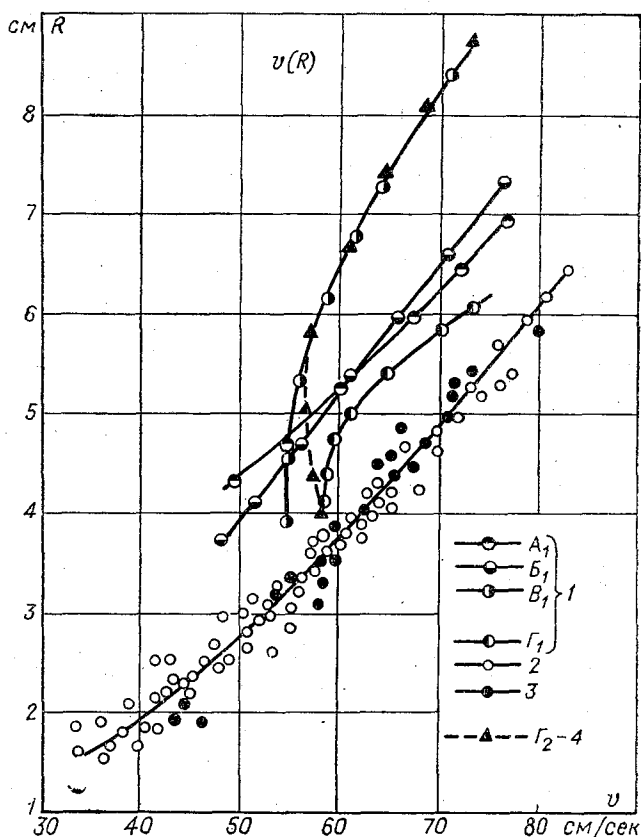


Рис. 3. Кривые зависимости $v(R)$:

1 — кривые, соответствующие отсеку № 1 при его взаимодействии с соседями; 2 — исходные данные, полученные в изолированных отсеках; 3 — исходные данные, полученные во взаимодействующих отсеках № 2 и 3 (кроме отсека № 2 серии Г); 4 — исходные данные и кривая для отсека № 2 серии Г при его взаимодействии с соседними

В серии Г, в отсеке № 2, находящемся в средней части сечения, при его взаимодействии с двумя смежными наблюдается такое же уменьшение скоростей, как и в отсеке № 1, серии В, т. е. в данном случае потери энергии при взаимодействии отсеков № 2 и 3 не компенсируются ее приращением в результате взаимодействия отсеков № 1 и 2. Для отсека № 3 этой серии картина аналогична картине в отсеках № 2 и 3 серий А, Б и В, т. е. скорости течения во взаимодействующем отсеке № 3 больше, чем в изолированном.

Существующая методика расчета русел составного сечения, основанная на раздельном определении расходов в отсеках по формуле Шези с последующим их суммированием, по данным наших экспериментов, приводит к преувеличению расхода в определенном диапазоне глубин примерно на 20%. Данное положение несколько расширяет сведения, полученные Маастик [7] и другими авторами для простых форм сечений.

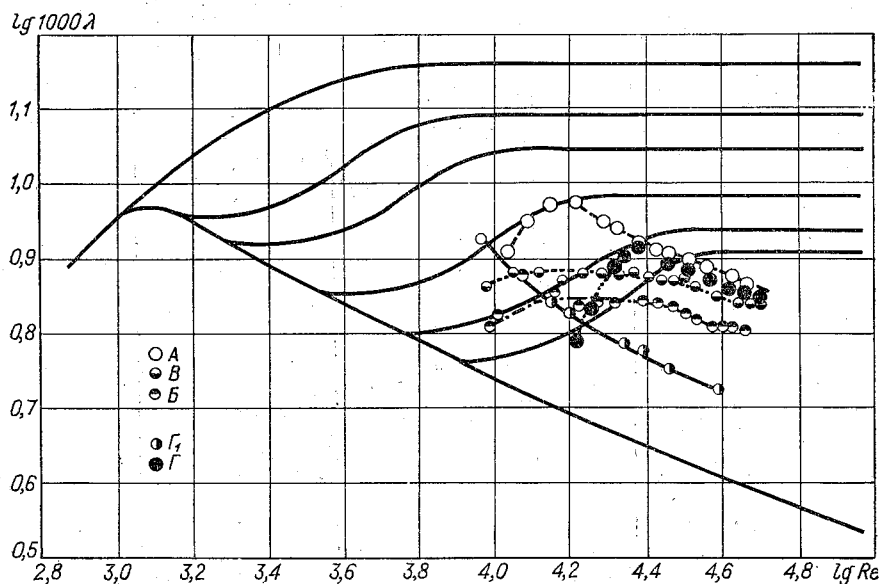


Рис. 4. Кривые зависимости $\lambda = f(Re)$, по данным Зегжды, дополненные данными экспериментов в составных сечениях (А, Б, В и Г):
 Γ_1 — данные, соответствующие потоку в прямоугольном изолированном отсеке

Наглядной иллюстрацией возрастания сопротивления движения потоков в сложных сечениях может служить общеизвестный график Зегжда-Накурадзе с нанесением на него данных экспериментов ЛГМИ (рис. 4).

Для прямоугольного сечения (рис. 4, Γ_1) кривые зависимости $\lambda = f(Re)$ располагаются несколько выше кривой, полученной Зегжда для гладкого русла, что является вполне закономерным, ибо заделка стыков между стеклами была выполнена недостаточно тщательно, а для поверхности, покрытой масляной краской (отсек № 1), коэффициент сопротивления имеет значения, большие, чем для стеклянной поверхности.

Для русел составных форм сечений кривые зависимости $\lambda = f(Re)$ располагаются выше соответствующих кривых русла прямоугольного сечения. При этом наибольшее сопротивление соответствует одноступенчатому руслу (А). Это, по-видимому, можно объяснить наибольшими затратами энергии на поперечные перемещение масс жидкости и турбулентное взаимодействие отсеков потока, движущихся с различными скоростями при данной форме сечения.

Наименьшие коэффициенты сопротивления соответствуют трехступенчатому симметричному руслу (серия В), что можно объяснить уменьшением потерь энергии на поперечное перемещение масс жидкости и свободную турбулентность. По-видимому, при узких руслах

и двухсторонней симметричной пойме происходит довольно быстрая стабилизация потока и почти полное отсутствие поперечных перемещений масс жидкости около створа измерений. Это объяснение нуждается в дальнейшей проверке и может быть применено только к узким русловым (средним) отсекам. Кривые $\lambda = f(Re)$ для остальных составных русел занимают промежуточное положение. Учитывая, что диапазон изменения числа Рейнольдса для всех составных сечений невелик (до 52 000), можно сделать в отношении их лишь предварительные выводы:

1. Гидравлический радиус недоучитывает влияния формы сечения даже при наличии гладких тормозящих стенок.

2. Абсолютные значения коэффициента сопротивления λ для составных сечений значительно больше, чем для прямоугольных.

3. Характер кривых зависимости $\lambda = f(Re)$ отличается как от кривых гладкого русла, так и от кривых шероховатого русла.

4. Увеличение коэффициента λ и изменение характера кривых $\lambda = f(Re)$ можно объяснить затратами энергии на поперечное перемещение масс жидкости и эффект турбулентного взаимодействия, возникающий на границе раздела потоков, движущихся с различными скоростями.

Эффект турбулентного взаимодействия возникает непосредственно при соприкосновении отсеков потока, движущихся с различными скоростями, и постепенно затухает по мере увеличения глубин и уменьшения разницы скоростей в соседних отсеках.

Нами по экспериментальным данным была предпринята попытка установления глубины, до значения которой влияние потерь энергии на процесс турбулентного взаимодействия является существенным. С этой целью были построены кривые $Q(H)$ и $v(H)$ для наиболее глубокого, названного русловым, отсека как при его изоляции, так и при взаимодействии с соседними.

Глубина, при которой данные кривые пересекались, и была принята за расчетную. Совершенно очевидно, что это значение будет занижено по сравнению с фактическим, так как при принятой методике не учитывается влияние потерь энергии на трение о боковые стеклянные стенки, когда измерение скоростей велось в изолированном русле, в то время как в действительности при воображаемой границе между отсеками этих потерь не будет и кривая $v = f(H)$ пройдет правее.

Таким образом, полученные значения глубин можно считать их нижним пределом.

Таблица 2

Серия	H_1 (русло)	H_2 (пойма)	H_2/H_1	
			абс.	%
А	13,7	8,0	8,0	58,5
			13,7	
Б	10,6	4,9	4,9	46,5
			10,6	
В	11,5	5,8	5,8	50,5
			11,5	
Г	10,5	4,7	4,7	44,8
			10,5	

Результаты, приведенные в табл. 2, находятся в хорошем соответствии с данными, полученными при анализе кривых $\lambda = f(\text{Re})$. Действительно, наибольшие потери энергии соответствуют двухступенчатому руслу (серия А) и пересечение кривых $Q(H)$ для потока руслового отсека при его изоляции и взаимодействии с соседними происходит при наивысшем наполнении (58,5).

Приведенные результаты позволяют сделать предварительный вывод о том, что в условиях рек, имеющих узкие русла, при выходе воды на пойму потери энергии на поперечные перемещения масс жидкости и турбулентное взаимодействие при односторонней пойме должны быть больше, чем при двухсторонней. Аналогичные результаты получены одним из авторов при анализе данных измерений на пойменных створах р. Амура [2], где уменьшение пропускной способности руслового отсека при его взаимодействии с односторонней поймой (пункты Кумара и Черняево) достигало 15—20%, а при взаимодействии с двухсторонней поймой не превышало 10%. Однако и этот вывод является предварительным и необходима дополнительная проверка как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Заключение

Данная работа носила поисковый характер и выполнена на установке, длина которой была недостаточна для установления равномерного режима. Поэтому все выводы имеют лишь качественный характер, а количественные характеристики имеют лишь иллюстративный характер.

Однако, подытоживая результаты исследования, можно сделать ряд интересных выводов:

1) пропускная способность гладких русел составных форм сечений меньше, чем прямоугольных (при том же гидравлическом радиусе);

В исследованных составных руслах наименьшая пропускная способность наблюдается в одноступенчатом сечении (А), а наибольшая — в симметричном двухступенчатом сечении (Б), что, по-видимому, можно объяснить характером поперечного перемещения масс жидкости;

3) Кривые зависимости $\lambda = f(\text{Re})$ для гладких ступенчатых русел располагаются выше соответствующих кривых прямоугольных русел. Характер кривых для русел ступенчатой формы качественно отличается от аналогичных кривых гладкого русла простой формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсенишвили К. И. К вопросу о влиянии формы поперечного сечения русла на гидравлические сопротивления. Тр. НИИГИ, М., вып. 22, 1963.
2. Барышников Н. Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
3. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
4. Горбачев П. Ф. Формулы скорости течения жидкости, ОНТИ, 1936.
5. Железняков Г. В. Гидрометрия. Изд. «Колос», М., 1964.
6. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Гостройиздат, Л., 1957.
7. Маастик А. А. Исследование сопротивления движению воды в открытых призматических руслах. Изд. Эстонской с.-х. Академии, Тарту, 1950.
8. Мостков М. А. Основы теории гидроэнергетического проектирования. Энергоиздат, М., 1948.
9. Форхгеймер Ф. Гидравлика, ОНТИ, 1935.
10. Negli M. Note sur l'écoulement de l'eau dans un canal a profil complexe, Paris, 1936.

Н. Б. БАРЫШНИКОВ, В. В. ВИНОГРАДОВ

СТОК ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РЕК БАССЕЙНА СРЕДНЕЙ ОБИ

В 1941 г. Г. В. Лопатин [4], проанализировав данные о стоке взвешенных наносов по 135 станциям, составил первую карту распределения средней мутности по территории СССР. Продолжительность наблюдений на 50% указанных станций составляла всего 1—2 года [13]. В последующие годы эта карта была уточнена сначала ее автором [5], а затем Г. И. Шамоным [14]. При составлении последней карты Шамонов использовал данные наблюдений по 1952 г. включительно по 1015 станциям. Причем только по 125 станциям (12,3%) имелись наблюдения за период, превышающий 10 лет.

С 1952 г. произошли большие качественные изменения в применяемых приборах и методике измерений расходов взвешенных наносов, а также значительно увеличилось как количество станций, ведущих эти измерения, так и среднее количество измерений на станции за год. Учитывая эти перемены, а также увеличение продолжительности рядов наблюдений, возникла существенная необходимость в уточнении или подтверждении разработанной ранее карты средней мутности и расчетных норм стока взвешенных наносов. Именно поэтому в последние годы появился ряд региональных работ, направленных на решение этой проблемы, в частности, исследование К. Н. Лисицыной [3] по Северному Казахстану, Г. Н. Хмаладзе [12] по территории Армянской ССР и В. Д. Шульца [15] по Средней Азии. С этой же целью на кафедре Динамики русловых потоков с 1965 г. начато изучение стока взвешенных наносов, распределения средней мутности и других характеристик наносов по отдельным районам территории Советского Союза.

В данной работе использованы материалы наблюдений по 1962 г. включительно по 59 станциям, расположенным в средней части бассейна р. Оби и прилегающей к ней территории.

Изменение количества станций, происшедшее с 1952 г. (данные использованы при построении карты средней мутности Г. И. Шамоном) по 1962 г., характеризуется данными табл. 1.

Таблица 1

Количество станций

Включая год	Число лет наблюдений						Всего
	1	2—4	5—10	11—15	16—20	>20	
1952	2	9	10	6	1	—	28
1962	1	19	26	6	2	5	59

Как видно из данных этой таблицы, число станций увеличилось примерно вдвое (при существенном росте рядов наблюдений). В то же время в 1962 г. резко возросло число ежегодных измерений расходов взвешенных наносов, достигшее 600.

Исходные данные не являются равнозначными, ибо наряду со станциями на р. Оби (Барнаул, Белогорье и др.), Кети (Максимкин Яр), Васюгане (ср. Васюган) и др., имеющими ряды наблюдений более 20 лет, есть станции с рядом наблюдений 1—2 года, при этом качество измерений в 1936—1937 гг. и 1960—1962 гг. различное. Необходимо учитывать также существенное усиление влияния на сток взвешенных наносов интенсивного гидротехнического строительства (например, строительства Новосибирской ГЭС и землечерпательных работ на судоходных реках).

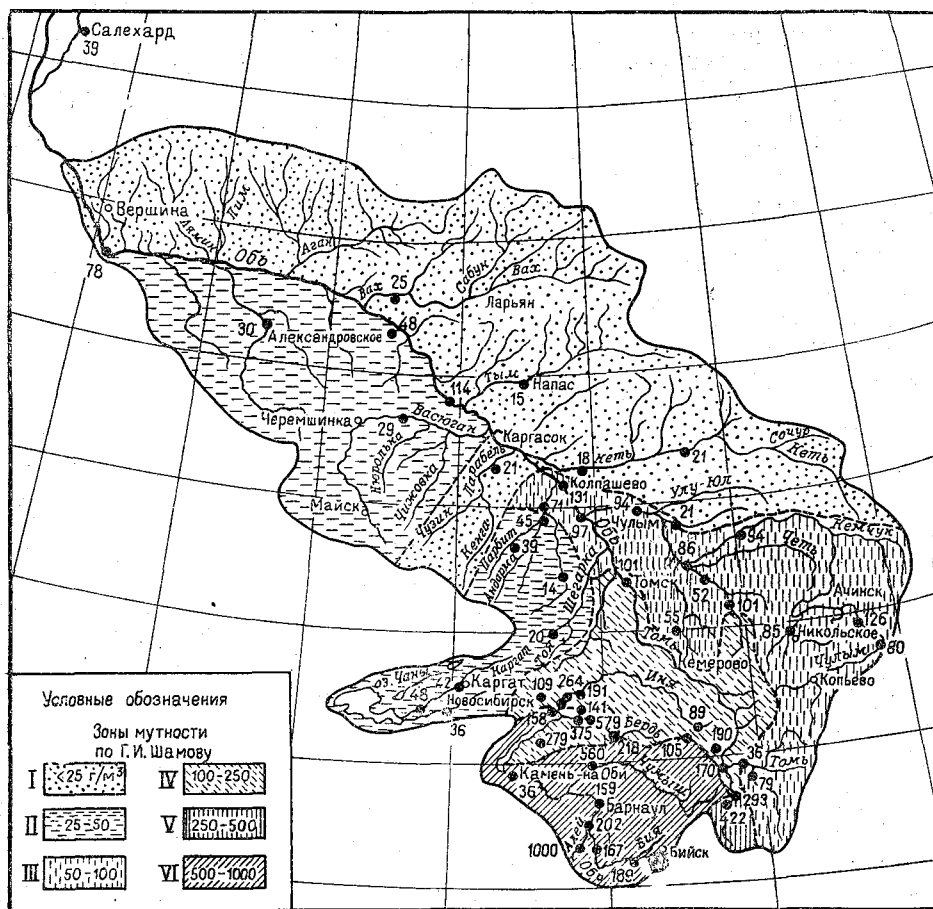


Рис. 1. Карта средней мутности рек на территории бассейна Средней Оби. Зоны мутности, по Г. И. Шамову:

I — $< 25 \text{ г/м}^3$; II — $25-50 \text{ г/м}^3$; III — $50-100 \text{ г/м}^3$; IV — $100-250 \text{ г/м}^3$; V — $250-500 \text{ г/м}^3$; VI — $500-1000 \text{ г/м}^3$

Распределение станций по территории исследуемого бассейна неравномерно (рис. 1). Так, если в южной части бассейна станции распределены с большой плотностью, то в северной — сеть наблюдений редкая и на многих реках станции отсутствуют.

Неравномерным является распределение станций наблюдений и в зависимости от площади водосбора (табл. 2).

Таблица 2

Количество станций		
Площадь бассейна, км ²	абс.	%
50	—	—
51—500	3	5,0
501—1 000	2	3,3
1 001—5 000	12	20,0
5 001—10 000	9	15,0
10 001—50 000	14	25,3
50 001—100 000	6	10,0
100 001—500 000	10	16,7
>500 000	4	6,7
Всего	60	100

По данным Западно-Сибирского УГМС после соответствующего анализа был произведен подсчет стока взвешенных наносов. Основной методикой принят расчет по связям средней и единичной мутностей $\rho_{\text{ср}} = k\rho_{\text{ед}} + b$. В качестве вспомогательных применялись метод интерполяции и подсчет стока наносов по кривым $R = f(Q)$.

Данные по стоку наносов, помещенные в фондovou таблицу Справочника по водным ресурсам, в основном удовлетворительного качества. Низкая точность подсчета стока наносов по ряду станций обусловлена:

а) недостаточным количеством измерений расходов наносов и единичной мутности в паводочный период, а также нарушениями методики измерений (р. Обь — г. Барнаул и г. Колпашев, р. Иня — д. Евтино, р. Мрас-Су — г. Мыски и др.);

б) низкой точностью определения жидкого стока из-за недоучета расходов воды на пойме (р. Васюган — с. Ср. Васюган, р. Бачат — с. Бачаты, р. Каракан — с. Рождественка и др.). Особенно велики ошибки расчетов в период до 1950 г.

Точность расчета норм стока взвешенных наносов, как известно, зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются продолжительность рядов наблюдений, вариация стока наносов, хозяйственная деятельность людей в русле и бассейне реки, строительство гидротехнических сооружений, землечерпательные работы и др. Учитывая, что водохозяйственное строительство в исследуемом бассейне, за исключением р. Оби (Новосибирская ГЭС), незначительно, было решено восстановить короткие ряды наблюдений по большинству опорных станций. Основным принят метод построения графических связей между среднегодовыми значениями расходов воды (Q) и взвешенных наносов (R), т. е. $R = f(Q)$.

В качестве примера приведены связи по двум станциям (рис. 2). По большинству постов получены надежные связи, исключение составляет р. Мрас-Су у г. Мыски, где связь отсутствует из-за короткого ряда наблюдений и приближенных значений стока наносов, полученных по недостаточному количеству измеренных расходов наносов, особенно в период паводков. Этим же фактором, а также погодными условиями предыдущего года, как правило, объясняются отклонения отдельных точек от расчетных связей $R = f(Q)$ и для ряда других рек (Кеть — с. Радионовка, Чулым — с. Балахта и др.).

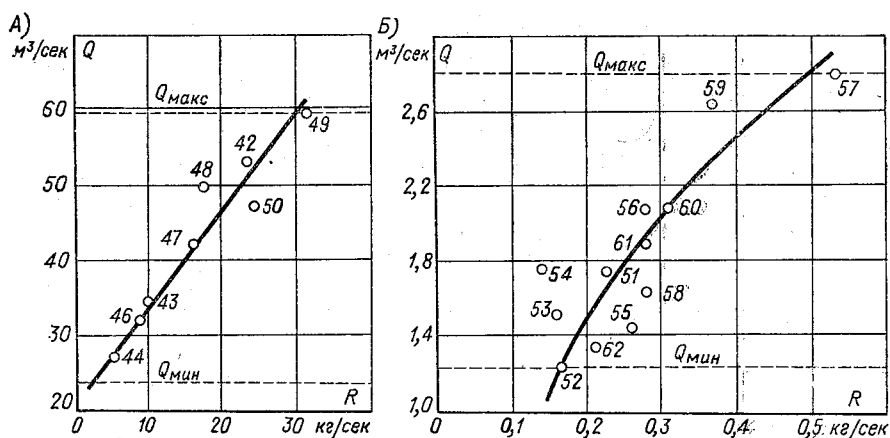


Рис. 2. Графики связи $R = f(Q)$:
А — р. Бердь — г. Искитим; Б — р. Коен — с. Нижний Коен

При наличии линейной связи между среднегодовыми расходами наносов и воды (рис. 2 А) норма стока наносов определялась графически по норме жидкого стока. При кратковременных наблюдениях за твердым стоком (1—4 года) и вычисленной норме жидкого стока (Q_0) приближенное значение среднемноголетнего расхода наносов (R_0) определялось по формуле

$$R_0 = \frac{RQ_0}{Q}.$$

В результате применения указанных методов фактические ряды были восстановлены и их продолжительность увеличена до 25—40 лет (табл. 3).

Изменчивость годового стока взвешенных наносов зависит от значительно большего количества факторов, чем изменчивость жидкого стока. Не останавливаясь на анализе причин указанного явления, ибо они детально описаны в ряде работ [3, 12, 13 и др.], отметим, что для определения характеристик изменчивости стока наносов (C_{v_R} и C_{s_R}) необходимы ряды наблюдений продолжительностью, значительно большей, чем для определения аналогичных характеристик жидкого стока. В то же время продолжительность наблюдений за твердым стоком повсеместно меньше продолжительности наблюдений за жидким стоком и для большинства станций не превышает 5—10 лет (табл. 1).

Таблица 3

№ п/п	Река — пункт	Число лет, к которому приведена норма	Площадь водосбора, тыс./км ²	Среднегоголетние значения				C_{vR}	C_{vQ}	α
				Q , м ³ /сек	R , кг/сек	ρ , г/м ³ (1962 г.)	ρ , г/м ³ (по Шамову, 1952 г.)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Обь — с. Фоминское . . .	12	982	1110	210	189	—	—	—	—
2	Обь — д. Калистратиха . .	7	138	1380	230	167	—	—	—	—
3	Обь — с. Сибиряк . . .	5	166	1440	290	202	137	—	—	—
4	Обь — г. Барнаул . . .	40	169	1450	230	159	168	0,29	0,20	—
5	Обь — г. Камень . . .	53	216	1560	680	436	340	0,36	0,20	—
6	Обь — д. Огурцово . . .	9	232	1660	600	362	382	0,21	0,19	—
7	Обь — г. Новосибирск . . .	59	252	1740	460	264	244	0,31	0,19	—
8	Обь — п. Могочин . . .	8	482	3920	380	97,0	78,0	—	—	—
9	Обь — г. Колпашев . . .	48	486	4220	550	131	131	0,21	0,16	—
10	Обь — д. Прохоркино . . .	5	738	5410	620	114	—	—	—	—
11	Обь — с. Александров- ское	3	756	5420	260	48,0	—	—	—	—
12	Обь — с. Белогорье . . .	32	2 60	10200	800	78,4	55,0	0,29	0,15	—
13	Обь — г. Салехард . . .	33	2430	12300	480	39,0	40,2	0,30	0,14	—
14	Каракан — с. Рождест- венка	9	1,14	3,59	1,0	279	—	—	—	0,018
15	Бердь — д. Искитим . . .	15	2,48	19,3	4,2	218	—	0,41	0,23	0,017
16	Бердь — д. Маслянино . .	5	6,27	37,0	14,0	379	—	—	—	0,037
17	Бердь — д. Ст. Искитим .	15	7,69	40,0	15,0	375	430	0,48	0,26	0,038
18	Коян — с. Коян	13	0,31	1,78	0,25	141	140	0,40	0,24	0,007
19	Иня (нижн.) — д. Евти- на	4	1,21	6,82	0,54	79,2	—	—	—	0,006
20	Иня (нижн.) — с. Бе- резовка	6	17,3	57,5	11,0	191	—	—	—	0,032
21	Бачат — с. Бачаты . . .	17	0,48	2,52	2,4	953	882	0,23	0,23	—
22	Тула — д. Ерестная . . .	19	0,73	1,29	2,0	1550	1440	0,58	0,54	—
23	Чик — с. Прокудское . . .	15	1,42	2,56	0,28	109	107	—	—	0,009
24	Томь — с. Безруково . . .	4	19,8	505	18,0	35,7	—	—	—	0,002
25	Томь — г. Новокузнецк . .	71	29,8	649	110	170	174	—	—	0,008
26	Томь — г. Томск	45	57,8	1090	110	101	63,8	0,20	0,20	—

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	Мрас-Су — г. Мыски . . .	10	8,79	178	14,0	78,7	—	—	—	0,005
28	Кондома — с. Аил . . .	29	7,08	128	54,0	422	204	—	—	0,030
29	Тельбес — Тельбесский рудник	33	1,11	25,3	6,4	253	—	—	—	0,006
30	Ускат — с. Красулино . .	12	1,10	4,58	0,87	190	—	—	—	0,011
31	Шегарка — д. Боборы- кина	10	8,19	18,5	0,40	21,6	—	0,66	0,56	0,004
32	Бакса — с. Пихтовка . .	16	1,42	4,36	0,085	19,5	—	—	—	0,003
33	Чулым — с. Балахта . . .	24	14,7	102	8,1	79,5	83,0	0,22	0,19	0,012
34	Чулым — с. Назарово . .	4	22,1	135	17,0	126	—	—	—	0,022
35	Чулым — с. Тегульдэт . .	21	55,3	299	28,0	93,6	—	0,19	0,14	—
36	Чулым — с. Зырянское . .	31	92,5	548	47,0	85,7	—	—	—	—
37	Чулым — п. Коммунарка .	25	131	790	74,0	93,6	80,7	0,33	0,19	—
38	Урюп — с. Изындоево . .	19	5,00	31,7	2,7	85,2	—	—	—	0,004
39	Кия — г. Мариинск . . .	27	9,82	148	15,0	101	—	0,53	0,23	0,005
40	Кия — д. Окунево . . .	8	14,9	173	9,0	52,1	—	—	—	0,004
41	Баим — с. Баим . . .	13	0,086	0,24	0,007	29,2	23,0	—	—	0,002
42	Яя — д. Владимировка . .	1	0,70	5,12	0,28	54,7	—	—	—	0,006
43	Чичка-Юл — пост. Фран- ца	10	5,21	28,7	0,61	21,2	—	0,44	0,21	0,004
44	Чая — с. Варгатер . . .	1	16,1	32,5	1,5	46,2	43,8	—	—	—
45	Кеть — д. Родионовка . .	10	71,5	448	8,1	18,1	—	0,33	0,20	—
46	Кеть — с. Максимкин Яр	26	38,4	244	5,2	21,3	33,0	0,21	0,21	0,004
47	Парабель — д. Соиспае- ва	13	24,6	87,5	1,8	20,6	—	0,47	0,30	0,008
48	Чая — с. Подгорное . . .	11	25,0	87,5	6,2	70,6	—	0,77	0,44	0,015
49	Парбоч — пос. Мель- строй	6	3,22	13,7	0,53	38,7	—	—	—	0,007
50	Икса — с. Плотниково . .	28	2,56	7,19	0,10	13,7	13,6	—	—	0,003
51	Васюган — с. Ср. Васю- ган	25	31,7	165	4,8	29,1	33,8	0,38	0,27	0,010
52	Тым — с. Напас . . .	26	24,5	180	2,7	15,0	—	0,27	0,18	0,004
53	Вах — с. Лобчинское . .	10	56,4	520	13,0	25,0	11,9	0,31	0,17	—
54	Б. Юган — с. Угут . . .	18	22,1	139	4,2	30,2	27,2	0,45	0,25	0,010
55	Чулым — с. Ярки . . .	11	8,85	4,69	0,17	36,3	—	0,77	0,86	0,009
56	Каргат — п. Гаврилов- ский	17	3,91	6,14	0,26	42,3	69,0	—	—	0,013
57	Каргат — с. Здвинск . .	26	6,44	8,40	0,40	47,6	—	—	—	0,016

Вычисленные значения коэффициентов C_{vR} (табл. 3) при коротких рядах наблюдений являются ориентировочными, ибо ошибки их расчета могут достигать 30—50%. Поэтому нами были рассчитаны и приведены в табл. 3 значения коэффициентов C_{vR} только для рядов наблюдений продолжительностью 10 лет и более.

Вероятные ошибки вычисления нормы стока наносов, определенные по формуле $\sigma\% = \frac{C_{vR}}{\sqrt{n}} 100$, колеблются в пределах 1,9—23,2%. На-

большие погрешности получены для рек: Чуя у с. Подгорного, Чулым у с. Ярки, Шегарка у д. Боборыкино, имеющих короткие ряды наблюдений и высокую изменчивость твердого стока. Вероятные ошибки расчета коэффициента C_{vR} , определенные по формуле

$$\sigma_{C_{vR}}\% = \frac{C_{vR} \sqrt{1 + 3C_{vR}^2}}{\sqrt{2(n-1)}} 100,$$

даже для рядов продолжительностью 10 лет и более также значительны и колеблются от 1,4 до 28,8%.

По данным 28 пунктов исследуемого бассейна была получена зависимость $C_{vR} = 1,52 C_{vQ}$ (рис. 3), которая близка к зависимости $C_{vR} = 1,64 C_{vQ}$ установленной Г. В. Лопатиным для равнинных рек.

В связи с тем что ряды наблюдений имеют недостаточную продолжительность для расчета коэффициента асимметрии C_{sR} , значения последнего определялись графически по кривым обеспеченности годового

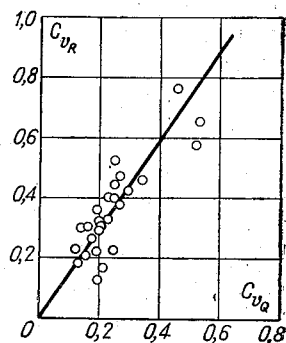


Рис. 3. График связи $C_{vR} = f(C_{vQ})$

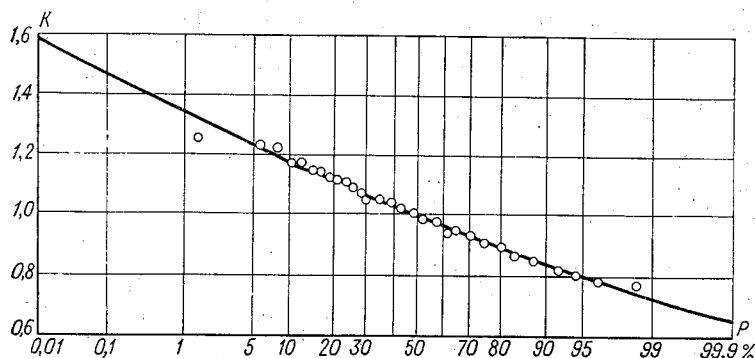


Рис. 4. Кривые обеспеченности годового стока наносов при $C_{sR} = 2 C_{vR}$; р. Томь — г. Томск (○ — эмпирические данные). $C_{vR} = 0,13$

стока наносов. Для большинства рек бассейна наилучшее соответствие эмпирической и теоретической кривых обеспеченности получено для значений $C_{sR} = 2 C_{vR}$ (рис. 4).

Одной из основных задач работы являлось уточнение разработанной Г. И. Шамовым в 1956 г. карты средней мутности для исследуемого района, так как после ее опубликования почти удвоилось количество станций, производящих наблюдения за стоком наносов на исследуемой территории, и примерно на 10 лет увеличилась продолжительность наблюдений на большинстве из них.

Для построения карты мутности использованы данные наблюдений на средних реках, наиболее распространенных по территории бассейна.

Для горных и полугорных районов в качестве расчетных приняты бассейны площадью от 200 до 20 000 км², а для равнинной части бассейна верхний предел значительно увеличен. Данные по крупным рекам, в частности по р. Оби, не использовались при построении карты мутности. Это обусловлено тем фактором, что сток наносов на них формируется в бассейнах с различной мутностью и даже находящихся вне пределов рассматриваемой территории. Поэтому средняя мутность крупных рек является интегральной характеристикой для всего бассейна, ограниченного замыкающим створом.

Данные по водотокам с малыми площадями водосборов также не использовались при построении карты распределения мутности, ибо сток их наносов зависит главным образом от местных эрозийных факторов, значительно различающихся на исследуемой территории [7].

Метод изолиний, используемый для изображения на карте закономерно изменяющихся по территории метеорологических и гидрологических величин, не может быть применен при картировании стока наносов или мутности, так как они определяются целым комплексом чисто местных физико-географических условий [7, 8]. Тем более, что при переходе от одного бассейна к другому, как правило, происходит не плавное, а скачкообразное изменение мутности. Поэтому Г. В. Лопатин [4], Г. И. Шамов [13], К. Н. Лисицына [3] и др. картирование мутности осуществляли в виде зон мутности. Такой же принцип использован и в нашей работе.

Поскольку мутность является результатом эрозийного воздействия стока на поверхность всего речного бассейна до замыкающего створа, то ее значения, как это сделано Г. И. Шамовым, отнесены к центру тяжести. По данным табл. 3 была построена карта зон средней мутности исследуемого бассейна (см. рис. 1).

Как видно на рис. 1, на исследуемой территории расположено шесть зон мутности из девяти принятых Г. И. Шамовым для рек территории Советского Союза (табл. 4).

Таблица 4

Зона мутности	I	II	III	IV	V	VI
Предел изменения мутности, г/м ³	< 25	25—50	50—100	100—250	250—500	500—1000

Зона I (< 25 г/м³) включает правобережные притоки р. Оби (Вах, Тым, Кеть, Чичка-Юл — правый приток р. Чулым), а также левобережный приток Оби р. Парабель. Малая мутность рек объясняется высокой степенью облесенности и заболоченности бассейнов. Границы зоны I значительно отличаются от соответствующих по карте Шамова, который не включил в нее бассейн р. Парабель, а также верхнюю и нижнюю части бассейнов рек Тым, Кеть и Чичка-Юл.

Зона II (25—50 г/м³) охватывает левобережные притоки р. Оби (Б. Юган, Васюган, Чая — с. Варгатер, Парбич, Икса и Шегарка). Эта зона относится к переходной от тайги к лесостепи. К зоне II отнесен также бассейн Обь — Иртышского междуречья — реки: Каргат и Чу-

лым. Г. И. Шамов бассейн р. Шегарки и верховья р. Каргат (п. Гавриловское) отнес к зоне III.

Зона III (50—100 г/м³) занимает лесостепную часть бассейна, а на юго-востоке — горные районы. Это бассейн р. Чулыма, низовье р. Чап и верховья р. Томи. Г. И. Шамов к этой же зоне отнес низовье р. Томи, хотя по уточненным данным средняя мутность в этом бассейне составляет 105 г/м³.

Зона IV (100—250 г/м³) включает ряд правобережных притоков р. Оби — Томь (нижняя часть), Кия (выше г. Мариинска), Иня (кроме притока Богат), а также бассейн левобережного притока Оби — р. Чик. Г. И. Шамов отнес к этой зоне также бассейн р. Кондомы, который сейчас входит в зону V.

К зоне V (250—500 г/м³) относятся низовье р. Бердь, бассейн р. Каракан и притоки р. Томи (Кондома и Тельбес).

Зона VI (500—1000 г/м³) включает прилегающее к Кулундинской степи Приобское плато, бассейны рек Барнаулки, Алея и правобережный приток Оби — р. Чуныш.

Такой диапазон колебания мутности рек объясняется в основном большой протяженностью территории исследуемого бассейна с севера на юг, многообразием физико-географических условий и значительным перепадом средних высот бассейнов рек.

Для большей части бассейна характерным является малое значение мутности, вызванное высокой степенью заболоченности и залесенности бассейна. Так, площадь зон мутности I и II (до 50 г/м³), расположенная в северной части и занимающая больше половины территории рассматриваемого бассейна, заболочена и залесена до 90—100%. Исключения представляют районы Обь-Иртышского междуречья (бассейны рек Чулым, Каргат и др.), относящиеся к зоне II и имеющие залесенность и заболоченность до 50%. Эти бассейны расположены в степной и лесостепной зонах, где эрозионные процессы более интенсивные. Однако здесь они ослабляются рядом факторов, в частности, плоским характером рельефа, малым поверхностным стоком, большим количеством бессточных понижений и др.

В северных предгорных районах Алтая, где распространены легко-размываемые лёссовидные породы, эрозионные процессы усиливаются. Речные воды этих районов отличаются наибольшей для Западной Сибири мутностью и относятся к зоне VI.

Основными природными факторами, влияющими на развитие водной эрозии и среднюю мутность рек, являются климатические, почвенно-геологические, ботанические, орографические и другие условия речного бассейна. Это влияние настолько сложно, что выделить действие каждого из перечисленных факторов в отдельности в настоящее время не представляется возможным.

В ряде случаев естественный ход развития эрозии нарушается в результате водохозяйственной деятельности людей.

Для определения величины мутности воды неизученных рек рядом исследователей была произведена попытка найти зависимость между средней мутностью и определяющими ее факторами. Так, Б. В. Поляков [9] предложил зависимости

$$\rho_{\text{ср}} = \alpha I, \quad (1)$$

$$\rho_{\text{ср}} = 10^{\alpha} \sqrt{I}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ — средняя мутность реки, г/м³;

I — осредненный уклон данного участка реки;

α — эрозионный коэффициент, объединяющий влияние целого ряда природных факторов, обуславливающих сток наносов.

Значения параметра α вычислены по формуле (2) для рек, площади водосборов которых не превышают 50 тыс. км², и приведены в табл. 3. На территории бассейна Средней Оби значения параметра α изменяются от 0,002 (р. Томь — с. Безруково, р. Баим — с. Баим) до 0,038 (р. Бердь — г. Искитим). Распределение параметра α по территории бассейна находится в соответствии с распределением средней мутности.

Для выяснения зависимости средней мутности от высоты бассейна, водосбора и среднегогодового расхода воды нами была предпринята попытка установить связи $\rho_{\text{ср}} = f(H)$, $\rho_{\text{ср}} = f(F)$ и $\rho_{\text{ср}} = f(Q_0)$ (рис. 5).

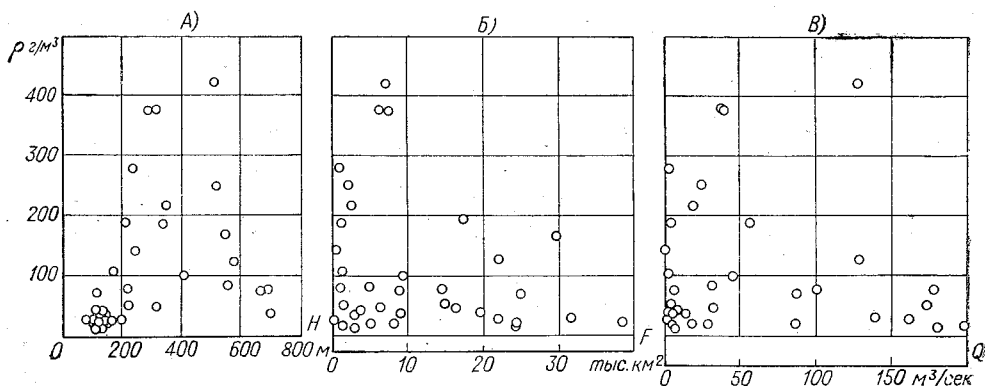


Рис. 5. Зависимость средней мутности рек от средней высоты бассейна (А), площади водосбора (Б), среднегодового расхода воды (В)

Однако связи средней мутности с указанными выше факторами не получилось (рис. 5). Это, по-видимому, объясняется несоответствием влекущей силы потока и степени его насыщенности наносами, на что указывали Ф. Форхгеймер [1] и В. Л. Шульц [15]. Так, Шульц приводит высказывание Ф. Форхгеймера о том, что «в природе вода редко бывает насыщенной, так что ее мутность не стоит в твердом соотношении со скоростью и лишь вообще стремится расти вместе со скоростью», и подкрепляет его конкретными данными по рекам Средней Азии. Аналогичные утверждения приведены в работах М. А. Великанова [1] и Н. И. Маккавеева [6].

Как видно на рис. 5, до высоты 500 м зависимость между мутностью и высотой бассейна прямая, а выше 500 м — обратная. Это можно объяснить лишь влиянием аazonальных факторов. Конкретного объяснения данного явления по имеющимся материалам мы не смогли дать.

Сток влекомых наносов. Современное представление о стоке влекомых наносов, изложенное в ряде работ [2, 10 и др.], позволяет считать, что существующими приборами (донными и сетчатыми батометрами) регистрируется далеко не весь объем стока. Не останавливаясь на вопросах точности измерений, следует подчеркнуть, что почти все сетевые станции системы ГУГМС недоучитывают перемещение наносов в виде различных форм русловых образований. Поэтому далеко неполные данные о стоке влекомых наносов, которые были получены на ГУГМС, дают лишь приближенное представление о перемещении «руслообразующих» наносов.

Нами на основании 240 измеренных расходов взвешенных и влекомых наносов (batimетры Полякова и «Дон») за период с 1954 по

1957 г. была сделана попытка определить величину соотношения стока влекомых и взвешенных наносов для различных рек бассейна Средней Оби. Как вытекает из проведенного анализа, величины указанных соотношений колеблются от 0,003 (р. Кеть — с. Максимкин Яр, 1955 г.) до 0,079 (р. Бердь — р. п. Маслянино, 1957 г.). Эти данные близки к рекомендованным Г. В. Лопатиным [5].

В результате проведенной обработки и анализа всех имевшихся материалов по 1962 г. включительно можно сделать следующие выводы.

1. Подтверждена и частично уточнена карта распределения средней мутности для рассматриваемого района, опубликованная Г. И. Шамовым в 1956 г.

2. Уточнены нормы стока взвешенных наносов. Наибольшие отклонения от данных Шамова, достигающие 40—60%, получены по рекам Кеть, Каргат, Вах, Томь и др.

3. Подсчитана изменчивость годового стока наносов. Значение коэффициентов вариации стока наносов колеблется от 0,13 до 0,77, а значения коэффициента асимметрии может быть принято равным $2C_{vR}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великанов М. А. Гидрология суши. Изд-е 5-е. Гидрометеиздат, Л., 1964.
2. Русловой процесс. Под ред. Кондратьева Н. Е. Гидрометеиздат, Л., 1959.
3. Лисицына К. Н. Формирование стока наносов водотоков и заиление прудов на территории Северного Казахстана. Тр. ГГИ, вып. 86, 1960.
4. Лопатин Г. В. О распределении среднего многолетнего стока взвешенных наносов рек территории Европейской части СССР. Тр. НИУ ГУГМС сер. IV, вып. 1, 1941.
5. Лопатин Г. В. Наносы рек СССР. Географиз, М., 1952.
6. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. Изд. АН СССР, М., 1955.
7. Методические рекомендации к составлению справочника по водным ресурсам СССР, вып. 10. Гидрометеиздат, Л., 1961.
8. Основные гидрологические характеристики. Том 15, вып. 1 (Алтай и Западная Сибирь). Гидрометеиздат, Л., 1965.
9. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1946.
10. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Гидрометеиздат, Л., 1965.
11. Форхгеймер Ф. Гидравлика. ОНТИ. М.—Л., 1936.
12. Хмаладзе Г. Н. Взвешенные наносы рек Армянской ССР. Гидрометеиздат, Л., 1964.
13. Шамоу Г. И. Речные наносы. Гидрометеиздат, Л., 1954.
14. Шамоу Г. И. Сток наносов рек СССР. Гидрометеиздат, Л., 1956.
15. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. Гидрометеиздат, Л., 1965.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ НА РЕКАХ С ПОЙМОЙ

Методы расчета пропускной способности пойменных русел в настоящее время основаны на формуле Шези. Пойменное русло рекомендуется [6] делить на русловую и пойменный отсеки и определять его пропускную способность по выражению

$$Q = Q_p + Q_n.$$

Скорости течения отсеков (v_p и v_n) определяются по формуле Шези-Срибного

$$v = C \sqrt{h_{cp} i} = \frac{1}{n} h_{cp}^x \sqrt{h_{cp} i}.$$

При этом вводятся допущения, которые детально описаны в ряде работ [5, 8, 9]. Следует остановиться лишь на одном — потерях энергии при взаимодействии отсеков как руслового с пойменным, так и отсеков с различной шероховатостью.

Если вопрос взаимодействия руслового и пойменного потоков, хотя и недостаточно, но освещен в литературе [4, 8 и др.], то влияние резкого различия шероховатостей по ширине потока на его пропускную способность было вскрыто лишь в последние годы экспериментальными работами кафедры Динамики русловых потоков ЛГМИ [2]. В этих работах было наглядно показано, что только за счет резкого различия шероховатостей по ширине потока, как это обычно наблюдается на поймах (трава, кустарник и др.), их суммарная пропускная способность снижается на величину до 30% по сравнению с поймами с однородной по ширине шероховатостью.

Указанные два фактора необходимо учитывать при расчетах пропускной способности русел с поймами и особенно при подсчете максимальных расходов по меткам высоких вод. В противном случае неизбежны ошибки в сторону завышения расчетных величин, в пределах достигающие 40—50%, только за счет неучета указанных факторов.

Эти положения могут быть иллюстрированы расчетами, проведенными по данным наблюдений на малых реках с целью выяснения надежности подсчета расходов воды на пойменных реках и приближенной оценки точности расчета максимального стока по меткам высоких вод рекомендуемыми методами. Исходными данными явились сведения по р. Птичь у с. Лучицы и р. Словечна у с. Кузьмичи за период

1949—1965 гг. Помимо сведений, опубликованных в ежегодниках, в распоряжении автора имелись полные материалы за 1964—1965 гг.

В 1964 г. на р. Птичь и в 1965 г. на р. Словечна прошли высокие паводки, вызвавшие затопление поймы соответственно на 60 и 52 см. В период паводка на р. Птичь измерено 10 расходов, освещающих 85% амплитуды колебания уровней поймы, а на р. Словечна — только один расход при высоких горизонтах затопления поймы.

Анализом полевых материалов установлено, что на р. Птичь при подсчете расхода воды № 10 допущена ошибка в сторону занижения, равная примерно $9 \text{ м}^3/\text{сек}$, а при измерении расхода воды № 13 существенно завышена площадь живого сечения. Поэтому расход воды № 13 при дальнейшем анализе рассматривается как сомнительный.

Расходы воды по рекам Птичь и Словечна при меженных уровнях измерялись в одном створе, а при паводочном — в другом. Гидростворы расположены на расстоянии 500—700 м друг от друга, между ним, примерно по середине, расположены опорные водомерные посты.

Учитывая приведенное, для всех уровней были приняты кривые расходов воды как для р. Птичь, так и для р. Словечна, отнесенные к паводочным створам. Кривые площадей были построены для определенного профиля паводочного гидроствора, а координаты кривых скоростей при меженных уровнях получены как частное от деления измеренного расхода воды на площадь сечения, снятую с кривой площадей для паводочного створа при том же уровне по опорному посту.

При этом изменение перепада уровней между гидростворами не учитывалось, что является вполне закономерным из-за небольшого расстояния между постами и отсутствия параллельных наблюдений за уровнями на обоих гидростворах. Изменение расходов воды между гидростворами не учитывалось по тем же причинам.

При построении кривой расходов воды для руслового отсека за 1964 г. при пойменных уровнях были использованы материалы полевых измерений и, как это видно по профилю гидроствора № 2 (рис. 1) для р. Птичь у с. Лучицы, русловой отсек был ограничен вертикалью, расположенной на расстоянии 248—250 м от постоянного начала.

За 1949 г. и другие при построении кривых для руслового отсека использованы данные, опубликованные в гидрологических ежегодниках под названием «главное русло». Ввиду того что в главное русло включена часть поймы, в расходы воды вводилась поправка, определенная по данным 1964 г.

К сожалению, следует отметить, что в большинстве материалов, опубликованных в гидрологических ежегодниках, сведения о расходах воды в потоках с поймой даются для русла и протоков. Когда же перемычки между руслом и протоками (или поймой) заполняются, приводятся сведения по всему потоку в целом.

Книжки полевых измерений находятся в архивах и являются труднодоступными; это значительно затрудняет анализ их материалов, затусhevывая эффект тормозящего влияния пойменного потока на русловую. К тому же при принятой методике обработки и публикации материалов при вычислении параметра C руслового отсека, необходимого для расчетов максимальных расходов воды по меткам высоких вод [6], могут быть допущены существенные ошибки в сторону занижения. Действительно, при включении отсеков поймы в состав главного русла происходит резкое увеличение ширины, а следовательно, и уменьшение средней глубины, что в свою очередь приводит к занижению парамет-

ра C , определяемого по формулам Срибного $C = \frac{1}{n} h^x$ или Павловского

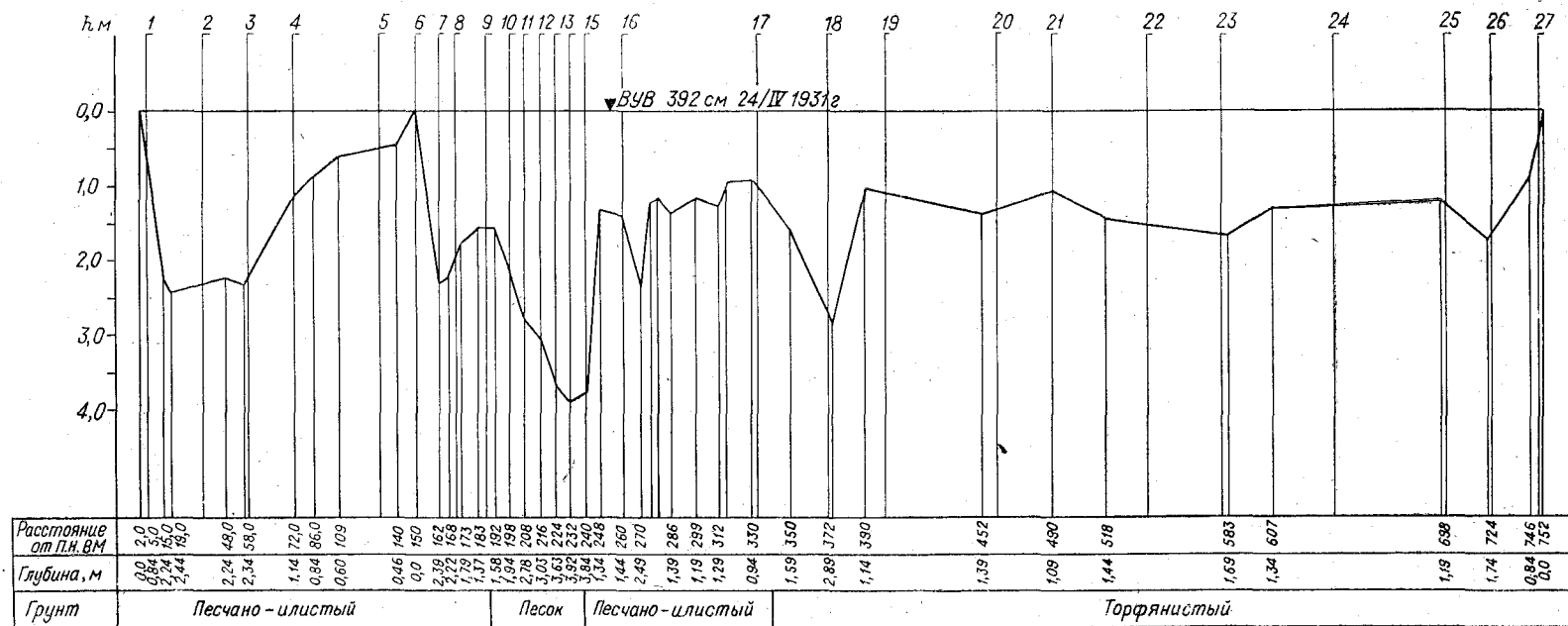


Рис. 1. Профиль поперечного сечения по гидроствору № 2 р. Птичь у с. Лучицы

$C = \frac{1}{n} h^y$ или по данным гидрометрических наблюдений. Для иллюстрации этого положения в табл. 1 приведены сведения о коэффициентах C по р. Птичь¹, полученные по фактическим данным для руслового отсека и для главного русла, принятого в ежегоднике, а также расчетные по формуле Срибного, рекомендуемой методическими указаниями гидрометслужбы [6]. При расчете коэффициента C значения параметров $\frac{1}{n}$ и x приняты соответственно равными 40 и 0,2, т. е. взято наибольшее из рекомендуемых значений параметра $\frac{1}{n}$ (близкое к фактическому). В соответствии же с рекомендациями М. Ф. Срибного [3] и состоянием данного водотока следовало бы принять значение параметра $\frac{1}{n}$ равным 25, что при расчетах приведет к занижению параметра C , а следовательно, и средней скорости потока на 30—40% по сравнению с фактической величиной.

Таблица 1

Значения параметра C м^{1/2}/сек

№ расхода	H , см	Русловой отсек			Главное русло		
		измеренная величина	вычисленная по формуле	$\frac{\Delta C}{C}$ %	измеренная величина	вычисленная по формуле	$\frac{\Delta C}{C}$ %
8	292	45,0	43,0	4,5	46,2	41,9	7,3
9	294	44,5	43,2	2,9	50,3	40,4	18,7
10	307	41,5	44,0	—6,0	38,1	36,7	3,3
11	310	41,6	44,2	—1,0	41,4	37,2	10,1
12	305	41,7	44,0	—5,2	43,6	41,4	5,5
13	(302)	42,4	44,0	—3,8	44,8	41,6	7,1
14	304	41,8	43,9	—5,0	43,9	41,3	6,0
15	287	45,4	42,8	5,7	45,7	42,1	8,1
16	280	46,7	42,4	9,2	46,8	41,3	11,8
17	272	46,5	42,3	9,0	47,0	41,2	12,3
		Среднее		5,7			9,0
		Наибольшее . . .		9,2			18,7

¹ Здесь и далее для иллюстрации приводятся результаты расчетов по р. Птичь как имеющие более высокую точность, ибо кривые расходов воды и вспомогательные получены по данным измерений 1964 г. с детальным освещением почти всей амплитуды колебания уровней. В то же время кривые расходов воды и вспомогательные по р. Словечна у с. Кузьмичи получены по данным ряда лет наблюдений. При этом книжки измеренных расходов воды имелись только за 1965 г. Как по р. Птичь, так и по р. Словечна выводы идентичны.

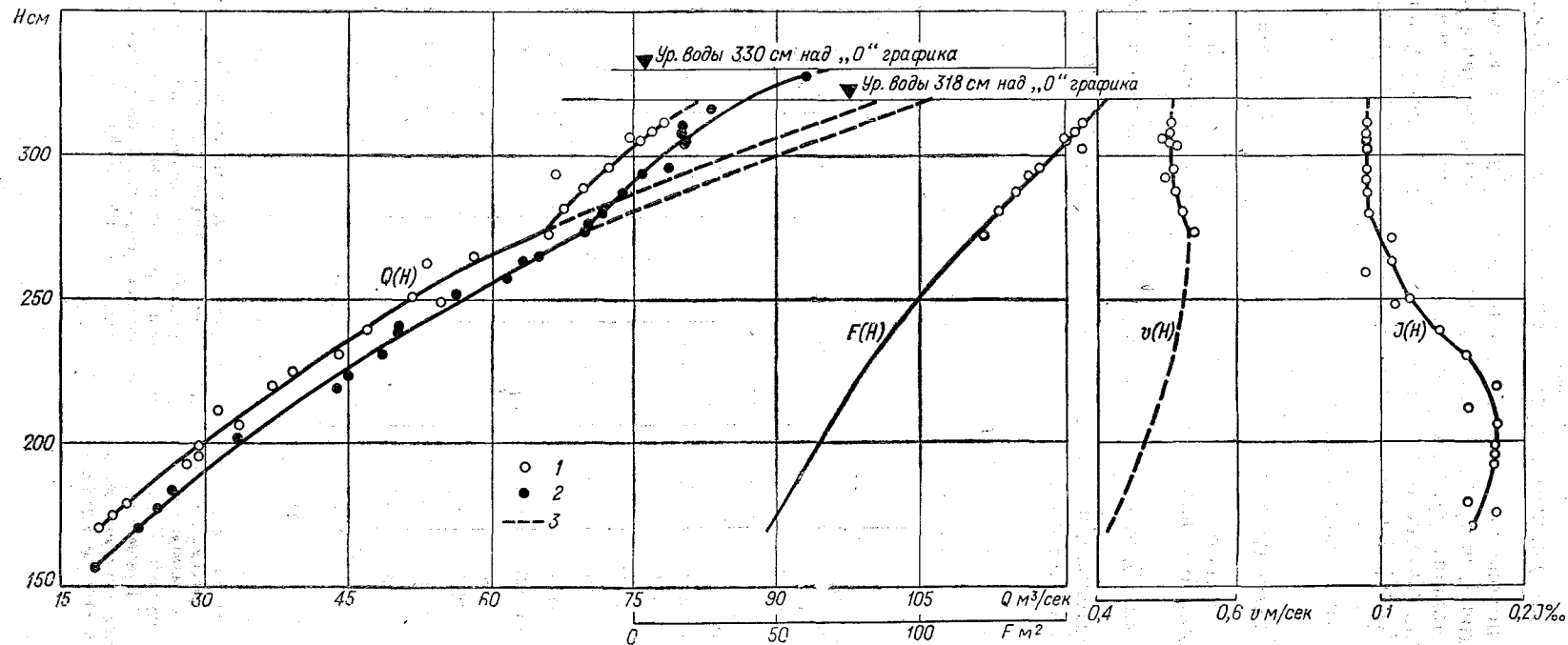


Рис. 2. Кривые зависимости: $Q = f(H)$; $F = f(H)$; $v = f(H)$ и $I = f(H)$ для руслового отсека гидроствора № 2 р. Птичь у с. Лучицы:
1 — данные за 1964 г.; 2 — данные за 1949 г.; 3 — экстраполированные части кривых

Как видно из данных табл. 1, при разделении потока, принятом Гидрометслужбой, ошибки в расчете параметра C , а следовательно, и средней скорости потока возрастают примерно вдвое.

Для разработки научно-обоснованных рекомендаций по расчету максимальных расходов воды через сухие русла необходимо произвести тщательный анализ всего имеющегося материала наблюдений при затопленной пойме, обязательно разбивая поток на русловой и пойменный отсеки.

В результате проведенного анализа и расчетов были построены кривые расходов воды и вспомогательные для руслового отсека, а также и кривые зависимости $C = f(h_{cp})$.

При выходе воды на пойму (примерно при уровне 275—285 см над «0» графика) происходит перелом кривых расходов воды (рис. 2). При этом происходит существенное уменьшение пропускной способности руслового отсека, вызванное поперечными течениями и эффектом турбулентного торможения, возникающего при взаимодействии вод руслового и пойменного отсеков потока,двигающихся с различными скоростями. Уменьшение расходов воды в русловом отсеке, обусловленное этими факторами, достигает на исследуемых реках 15—30%.

При расчетах и построении зависимости $C = f(h_{cp})$ получены две кривые, одна для низких, другая для высоких значений уровней. Наличие двух кривых объясняется характером изменения глубин на гидростворе. Действительно, при уровне воды, примерно равном 250 см, происходит значительное расширение русла из-за его слияния с протоком (рис. 1), что приводит к резкому, скачкообразному изменению средних глубин. Так как в данной работе анализируются вопросы влияния поймы на пропускную способность русла, то приведена только одна кривая $C = f(h_{cp})$ для высоких уровней воды (рис. 3). На рис. 3 четко прослеживается перелом кривой $C = f(h_{cp})$ при глубинах, равных 1,33—1,37 см, что соответствует уровням затопления поймы.

Учитывая приведенное, а также результаты разработок по р. Амуру [2], хотя последняя и находится в иных физико-географических и геологических условиях, можно сделать вывод о том, что кривые $C = f(h_{cp})$ для руслового отсека нельзя экстраполировать выше бровки основного русла при отсутствии наблюдений при пойменных уровнях.

Значения ошибок расчетов расходов воды в зоне резких переломов поперечного профиля могут быть особенно велики при подсчете максимальных расходов воды (путем разбивки потока на русловый и пойменный отсеки при отсутствии данных измерений) при пойменных уровнях и экстраполяции кривых расходов воды руслового отсека по методу тенденций, без учета тормозящего эффекта поймы. Ошибки расчетов в этом случае могут достигать 30% в сторону завышения (табл. 2).

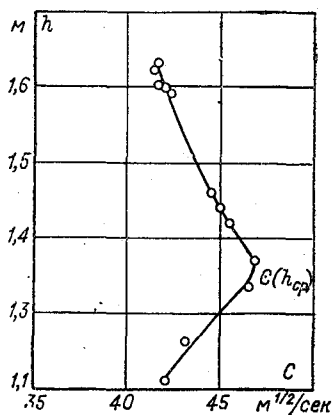


Рис. 3. Кривые зависимости $C = f(h_{cp})$ для руслового отсека гидроствора № 2 р. Птичь у с. Лучицы

Таблица 2

Расходы воды для руслового отсека, $\text{м}^3/\text{сек}$ р. Птичь у с. Лучицы

Н, см	1964 г.		$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{кр}}}$ %	1949 г.		$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{кр}}}$ %
	$Q_{\text{кр}}$	$Q_{\text{расч}}$		$Q_{\text{кр}}$	$Q_{\text{расч}}$	
275	66,0	66,8	1,2	70,0	73,0	3,0
280	66,9	70,1	4,8	72,0	77,0	7,0
285	68,2	73,5	7,0	73,7	81,2	10,2
290	69,9	77,4	10,7	76,8	85,5	11,3
295	72,0	81,3	12,9	78,9	90,0	12,4
300	73,8	85,2	15,5	79,6	94,5	17,8
305	75,5	89,1	18,0	79,8	99,0	24,1
310	77,7	93,0	19,7	80,5	103,5	28,5
315	80,0	97,0	21,2	82,5	108	31,0
320	82,5	102,0	23,6	87,0	112,5	29,3
325	—	—	—	92,4	117	26,7
Наибольшее . . .			23,6			31,0

Близкие результаты получены также и по р. Словечна у с. Кузьмичи. Эти данные находятся в близком соответствии с расчетами Н. Б. Барышникова [1], выполненными по ряду створов р. Амура, где наибольшее отклонение расчетного расхода от фактического при сравнительно небольшом затоплении поймы получилось равным 16—20%.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать ряд выводов, имеющих существенное значение как для методики подсчета максимального стока по меткам высоких вод, так и в связи с анализом материалов наблюдений, проводимых Гидрометслужбой при подготовке нового издания справочников по водным ресурсам СССР.

Выводы

1. В данной работе на примере двух малых рек подтверждены выводы, полученные Д. Е. Скородумовым [10], Г. В. Железняковым [6] и др. для средних и крупных рек, о резком уменьшении пропускной способности русел при выходе воды на пойму.

2. Данное исследование, а также работы других авторов [8, 9], указывают на то, что резкие переломы поперечного профиля русла существенно снижают его пропускную способность. Этот вывод ставит под сомнение утверждение В. Н. Гончарова [4] о том, что пропускная способность русел сложной формы больше пропускной способности русел прямоугольного сечения.

3. В гидрологических ежегодниках, а также в другой справочной литературе необходима публикация материалов о расходах воды на реках с поймой путем подразделения их на русловой и пойменный отсеки, а не на главное русло и пойму, т. е. в главное русло нельзя включать отсеки, соответствующие пойме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
 2. Барышников Н. Б. Пропускная способность русла с различной шероховатостью по ширине. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
 3. Быков В. Д. Гидрометрия. Гидрометеиздат, Л., 1965.
 4. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
 5. Железняков Г. В. Гидравлическое обоснование методов речной гидрометрии. Изд. АН СССР, М.-Л., 1950.
 6. Методические указания ГГИ, № 49. Гидрометеиздат, Л., 1957.
 7. Наставление гидрометстанциям и постам, вып. 6 ч. I и III. Гидрометеиздат, Л., 1958.
 8. Скородумов Д. Е. Гидравлические основы экстраполяции кривых расходов до вышших уровней. Тр. ГГИ, вып. 77, 1960.
 9. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел. Тр. ГГИ, вып. 128, 1965.
 10. Спицын И. П. О взаимодействии потоков основного русла и пойны. Метеорология и гидрология, № 10, 1962.
-

Н. Б. БАРЫШНИКОВ, В. А. РОЗАНОВ

УМЕНЬШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ С НЕОДНОРОДНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПО ШИРИНЕ

Исследования потерь энергии в руслах с неоднородной шероховатостью необходимы для решения ряда практических задач.

Первая задача — расчет пропускной способности пойменных потоков — детально освещена в обширной литературе [4, 6, 8 и др.]. Энергия в этом случае затрачивается на поперечное перемещение масс жидкости и «свободную турбулентность» при турбулентном взаимодействии между потоками, движущимися с различными скоростями. Величины этих потерь, по данным Д. Е. Скородумова [8], И. П. Спицына [3] и Н. Б. Барышникова [3], могут достигать 30—50% энергии руслового потока.

Вторая проблема — расчет русел под ледяным покровом. Подход к решению этой задачи должен быть принципиально отличен от первой, ибо в данном случае задача сводится к рассмотрению потока между двумя параллельными стенками с различной шероховатостью [7]. Расчету таких русел также посвящена довольно обширная литература [4, 5, 7 и др.].

В указанных работах поток под ледяным покровом разделяется на два. Граница раздела проходит по линии максимальной скорости. Расчет поля скоростей в этом случае сводится к доказательству равенства средних скоростей составляющих потоков [4, 7]. Задача, как правило, приводится к плоской, решение доводится до расчета увеличения глубин при наличии ледяного покрова по сравнению с открытым потоком, т. е. до учета потерь энергии [4].

Третья проблема — расчет пропускной способности каналов, шероховатость стенок которых отлична от шероховатости дна.

Эта проблема, являющаяся наиболее актуальной при строительстве ирригационных и других каналов, также довольно широко освещена в литературе [1, 5 и др.]. Обширные эксперименты выполнены Ф. Рампони, К. Р. Пиллай [10], А. М. Ясиным [11], К. Э. Шиперко, И. Д. Денисенко [5]. На основании указанных выше, а также обширных экспериментов других авторов [10, 11] произведена разработка рекомендаций для расчета приведенного коэффициента Шези ($C_{пр}$) посредством разбивки потока на два составляющих с однородной шероховатостью. При этом, как и в потоках подо льдом, линия раздела живого сечения совпадает с линией максимальных скоростей. По этой линии сила внутреннего трения равна нулю [5].

Далее, делается допущение, что оба потока являются самостоятельными, независимыми друг от друга и гидравлические радиусы составляющих потоков (R_1 и R_2) равны между собой и равны гидравлическому радиусу всего потока [5], т. е.

$$R_1 = R_2 = R.$$

Исходя из этого равенства, а также из тождеств

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \text{и} \quad \omega = \omega_1 + \omega_2,$$

где Q и ω — расход и площадь живого сечения потока в целом, Q_1, Q_2 и ω_1, ω_2 — соответственно расходы и площади живых сечений частей потока,

дальнейший расчет сводится к определению приведенного коэффициента шероховатости ($n_{пр}$) или приведенного коэффициента Шези ($C_{пр}$).

Не останавливаясь на детальном анализе работ, посвященных данной проблеме, [5, 7, 10, 11], следует указать, что в исследованиях этой группы поток рассматривается чисто механически. Физическая сущность явления потерь энергии на процессы взаимодействия составляющих отсеков не вскрывается.

Четвертая проблема — расчет потерь энергии при слиянии потоков, имеющих различные скорости и углы сходимости. Этот вопрос, учитывая его большую практическую значимость, можно подразделить еще на два самостоятельных, а именно, расчет потерь энергии при соударении потоков в водосбросных сооружениях и непосредственные потери энергии при слиянии потоков. Детальный анализ этого вопроса приведен в работах Э. М. Факторовича [9]. Принципиальное отличие этой проблемы от предыдущих заключается в том, что в ней основным источником потерь энергии являются местные, в то время как в ранее рассмотренных проблемах таковыми являлись потери по всей длине потока (на поперечное перемещение масс жидкости и свободную турбулентность при взаимодействии потоков с различной шероховатостью по ширине).

Нами предпринята попытка постановки и решения задачи изучения потерь энергии на поперечное перемещение масс жидкости и свободную турбулентность при взаимодействии отсеков потока с различной шероховатостью. Эксперименты выполнялись в лаборатории ЛГМИ с 1963 по 1967 г.

В гидравлическом лотке с постоянным уклоном длиной 9 м (рабочая часть) и шириной 2,5 м была смонтирована модель плоского русла. Детальное описание установки и ее схема приведены в работе Н. Б. Барышникова [2]. Уклон дна установки $I = 2,4\%$. При выполнении опытов русло было подразделено на три отсека шириной 0,75 м каждый. Дно среднего отсека во всех сериях опытов было гладким (зеркальное стекло толщиной 7 мм с тщательной заделкой швов специальной мастикой), а крайних — шероховатым. При этом в различных сериях опытов шероховатость дна крайних отсеков изменялась (табл. 1).

Таблица 1

Изолированные отсеки							
Серия	I	II	III	IV	V	VI	VII
Шероховатость дна отсека, см	1,1	гл.	2,2	1,8	4,5	0,2	3,5
Взаимодействующие отсеки							
Серия	I—II	II—III	II—IV	II—V	II—VI	II—VII	I—II—III II—VI—VII
Шероховатость дна отсека, см	1,1 гл.—	гл.—	гл.—	гл.—	гл.—	1,1—гл.	гл.—
	гл.—	2,2	1,8	4,5	0,2	3,5	2,2 0,2—3,5

Примечание. За шероховатость дна условно принята крупность (K) равнозернистых частиц, наклеенных на дно отсека. гл. — гладкое

С целью исключения влияния густоты размещения выступов на режим сопротивления во всех опытах расстояния между центрами частиц, составляющих дно русел (l), были равны одной-двум крупностям частиц (K), т. е. $\frac{l}{K} = 1 \div 2$.

Во всех семи сериях опытов в качестве шероховатости использовалась округлая галька и только в сериях V и VII был применен «рваный» щебень.

Как видно из данных табл. 1, семь серий опытов было выполнено в изолированных отсеках, шесть — в двух взаимодействующих между собой отсеках и две — в трех взаимодействующих отсеках. Общее количество опытов¹ 450.

Изоляция отсеков русла осуществлялась вертикальной стеклянной перегородкой толщиной 7 мм.

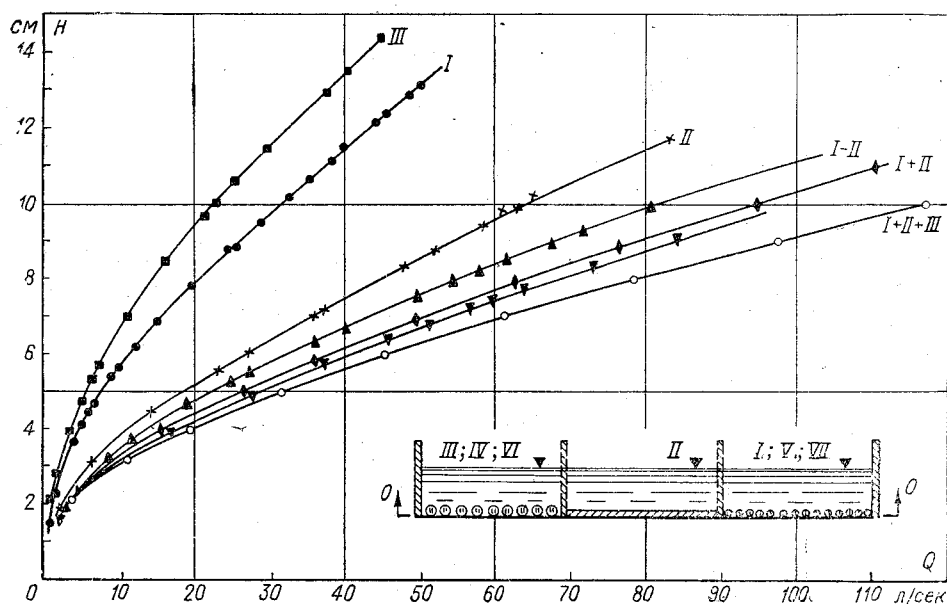


Рис. 1. Совмещенные кривые зависимости $Q = f(H)$:
I, II и III — для изолированных отсеков; I-II и I-II-III — для взаимодействующих отсеков; I+II и I+II+III — суммарная для изолированных отсеков

В процессе эксперимента выполнялись следующие виды работ:

а) устанавливался близкий к равномерному режим движения воды на модели, что проверялось измерением глубин через 1 м по длине установки. Режим на установке считался равномерным, если изменение глубин по длине не превышало точности их измерения. Метод установления равномерного режима, предложенный А. П. Зегжда, является довольно трудоемким, поэтому он применялся только в отдельных экспериментах в качестве дополнительного контроля;

¹ Все эксперименты выполнялись дипломантами кафедры, ныне инженерами: А. Н. Федюниным, В. Ф. Николаевым, А. П. Граевским и В. Г. Саликовым при участии В. А. Розанова.

б) измерение расходов воды, как уже указывалось, производилось треугольным мерным водосливом, а во взаимодействующих отсеках параллельно и гидрометрическим способом, как правило, в трех створах, расположенных друг от друга на расстоянии 2—2,5 м. Расхождение расходов воды, измеренных различными способами и в различных створах, составляло 3—5%, что свидетельствует о достаточно высокой точности измерений. Дополнительным контролем надежности исходных данных являлись кривые расходов воды (рис. 1), полученные как для изолированных, так и для взаимодействующих отсеков потока. Отклонения измеренных расходов воды от кривых $Q = f(H)$ не превышают 2—3%.

Анализ экспериментальных данных

Задачей данного анализа является выяснение и количественная оценка источников уменьшения пропускной способности потока, возникающих при турбулентном взаимодействии его отсеков, движущихся с различными скоростями. С этой целью в процессе экспериментов на установке задавались различные условия взаимодействия отсеков потока как при отсутствии интенсивного процесса перетекания из одного отсека потока в другой, так и при наличии такого перетекания. Для обеспечения таких условий изменялась подача расхода в шероховатый отсек. Действительно, когда пропускная способность взаимодействующего отсека потока была значительно меньше подаваемого в него расхода воды, происходил процесс интенсивного перетекания жидкости в соседней взаимодействующий отсек с гладким дном, что фиксировалось либо визуально, либо фотографированием движения опилок или красящих веществ.

Установление режима, при котором отсутствовало интенсивное перетекание масс жидкости из одного отсека в другой, также достигалось искусственной регулировкой подачи расхода воды в отсек с повышенной шероховатостью.

Опыты подобного рода начаты на кафедре в 1967 г. и результаты будут освещены в последующих работах, а в данной работе приводится экспериментальный материал, полученный при взаимодействии потоков в условиях поперечного перемещения масс жидкости.

Рассмотрим количественные характеристики, полученные в результате анализа и обработки экспериментальных данных. На рис. 1 в качестве примера приведены кривые расходов воды как для взаимодействующих, так и для изолированных отсеков, а также построена кривая, полученная простым суммированием расходов воды изолированных отсеков при одинаковом уровне ($I + II$) и ($I + II + III$).

Как видно на рис. 1, суммарная кривая расположена значительно правее кривой для взаимодействующих отсеков. Следовательно, несмотря на увеличение сопротивления за счет трения о разделительную стенку, пропускная способность изолированных отсеков значительно больше, чем при их взаимодействии.

Величина разности расходов воды (ΔQ л/сек), полученная по указанным кривым при постоянном значении уровня, определяется суммарными затратами энергии на взаимодействие отсеков с различной шероховатостью.

Аналогичные результаты получены при анализе и остальных серий опытов (табл. 2).

Таблица 2

Уменьшение пропускной способности потока при взаимодействии его отсеков (ΔQ)

H, см	Отсек											
	VI—II		I—II		IV—II		III—II		VII—II		V—II	
	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%
2,0	0,5	15,6	0,4	13,4	0,3	10,7	0,4	15,4	—	—	—	—
3,0	1,4	14,7	1,2	14,5	1,2	15,4	1,5	20,0	1,0	15,1	1,0	16,2
4,0	1,9	10,4	2,6	16,2	2,7	17,8	3,3	22,2	3,2	24,6	3,6	28,8
5,0	2,8	9,5	4,3	16,5	5,1	20,6	5,9	24,5	5,4	25,2	6,3	31,0
6,0	3,7	8,7	6,3	16,7	7,6	21,4	8,3	24,0	8,4	27,1	9,4	32,3
7,0	3,6	6,3	8,0	15,9	10,0	21,1	10,7	23,3	11,6	27,8	12,8	33,0
8,0	3,3	4,5	9,9	15,4	11,9	19,8	13,4	23,0	14,9	27,9	16,9	34,8
9,0	0,6	1,0	11,5	14,5	13,9	18,8	15,5	21,6	17,9	27,2	21,0	34,1
10,0	0,1	0,1	12,9	13,7	15,2	17,2	17,8	20,7	21,1	26,8	25,2	33,9
11,0	—	—	13,8	12,4	16,0	15,4	19,8	19,6	24,5	26,4	29,3	33,5
12,0	—	—	—	—	17,1	14,2	21,4	18,4	28,4	26,5	33,1	32,7

Как видно из данных табл. 2, уменьшение пропускной способности потока (ΔQ) возрастает пропорционально разности шероховатостей взаимодействующих отсеков и, как правило, увеличивается с ростом уровней. Исключение составляют отсеки II—IV (гладкий, $K = 0,2$ мм), ΔQ для которых достигает максимального значения при уровне 6—7 см и уже при уровне 10 см становится близким к нулю. Это означает, что потери энергии на турбулентное взаимодействие указанных отсеков

становятся равными потерям энергии на трение о разделительную стенку уже при глубинах, близких к 10 см. Следовательно, при малой разнице шероховатостей, т. е. малой разнице скоростей в отсеках, потери энергии на турбулентное взаимодействие малы и уже при глубинах 10—20 см их можно не учитывать. По-видимому, поперечное перемещение масс жидкости в этом случае также мало и затраты энергии на него меньше потерь энергии на трение о разделительную стенку. Вторым весьма важным выводом является положение о затухании указанного эффекта с увеличением

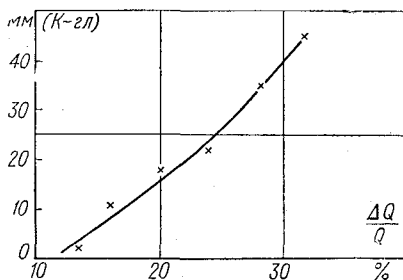


Рис. 2. Кривая зависимости максимального уменьшения пропускной способности потока (%) от разности шероховатостей его взаимодействующих отсеков

глубин, что хорошо прослеживается при малой разности шероховатостей. Максимальные величины уменьшения пропускной способности потока пропорциональны разности шероховатостей взаимодействующих отсеков (рис. 2).

• Большой интерес представляет анализ уменьшения пропускной способности при взаимодействии трех отсеков потока с различной шероховатостью по ширине. Уменьшение пропускной способности трех

взаимодействующих отсеков потока, так же как и при взаимодействии двух отсеков, определяется суммарными затратами энергии на поперечное перемещение масс жидкости и свободную турбулентность и характеризуется данными, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Уменьшение пропускной способности за счет взаимодействия трех отсеков потока с различной шероховатостью

H, см	$Q_{I-II-III}$		$Q_{VI-II-VII}$		$\Delta Q = \sum Q_i - Q_{I-II-III}$		$\Delta Q = \Delta Q_{I-II} + \Delta Q_{II-III}$		$\Delta Q = \sum Q_i - Q_{VI-II-VI}$		$\Delta Q = \Delta Q_{VI-II} + \Delta Q_{II-VII}$	
	л/сек	л/сек	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%	л/сек	%
3	8,7	9,3	1,1	12,6	2,3	3,1	0,8	8,8	2,4	26,4		
4	16,7	17,8	2,6	15,6	6,3	37,7	1,8	10,7	5,1	30,3		
5	27,2	28,5	4,2	15,4	10,2	37,5	3,7	13,8	8,2	30,6		
6	40,0	40,0	5,5	13,7	14,6	36,5	7,1	18,3	12,1	31,3		
7	52,7	52,6	8,5	16,1	18,7	35,5	11,3	21,6	15,2	29,1		
8	66,7	66,3	11,9	17,7	23,3	34,9	16,3	24,2	18,2	27,1		
9	82,3	81,3	14,6	17,8	27,0	32,8	19,5	23,5	18,5	22,2		
10	98,0	96,0	18,7	18,1	30,7	31,3	25,3	25,2	21,2	21,2		

При установившемся режиме движения, когда отсутствует перетекание масс жидкости из одного отсека в другой, и процесс турбулентного взаимодействия отсеков потока характеризуется только затратами энергии на свободную турбулентность, уменьшение пропускной способности русла ΔQ) должно быть существенно меньшим, чем в условиях поперечного перемещения масс жидкости. В указанном случае уменьшение пропускной способности русла при взаимодействии трех отсеков потока должно быть равно сумме уменьшения пропускной способности двух пар взаимодействующих отсеков. Например, величина ΔQ при взаимодействии отсеков I, II и III должна быть равна сумме величин ΔQ при взаимодействии отсеков I—II и II—III за вычетом потерь на торможения о разделительную стенку.

Действительно, как видно из данных табл. 3, максимальное уменьшение пропускной способности при взаимодействии трех отсеков потока достигает 24% (отсек VI—II—VII) и 17,8% (отсек I—II—III), максимальное значение при взаимодействии двух пар отсеков (I—II и II—III) составляет 37,7%, а при взаимодействии других пар отсеков (VI—II и II—VI)—30,6%. Еще более наглядно эти выводы подтверждаются рис. 3, на котором указанные суммарные кривые уменьшения пропускной способности русел располагаются значительно правее кри-

вых для трех взаимодействующих отсеков. Как видно на рис. 3, кривая уменьшения пропускной способности трех взаимодействующих отсеков потока еще не имеет максимума, в то же время соответствующие суммарные кривые для двух пар взаимодействующих отсеков имеют максимум при уровнях 4—6 см и при дальнейшем росте уровня — тенденцию к уменьшению. К сожалению, мощность насосных установок не позволила провести опыты в более широком диапазоне, поэтому сделать более детальные выводы по данному вопросу не представляется возможным.

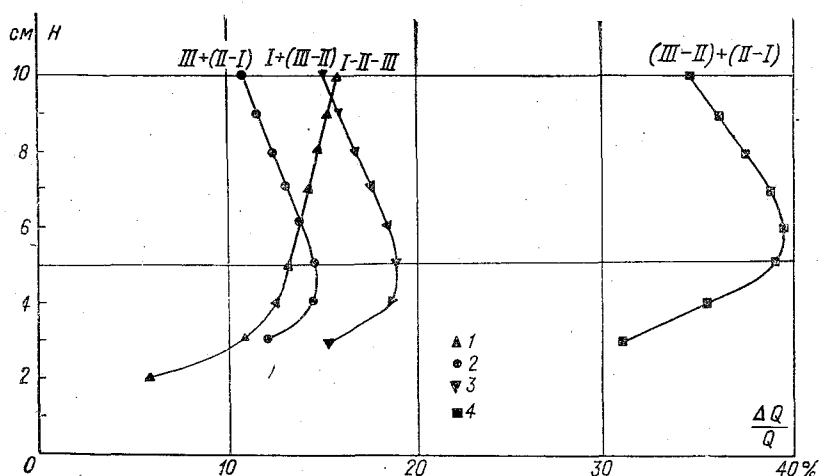


Рис. 3. Кривые зависимости уменьшения пропускной способности русла (%) от уровня:

1 — для взаимодействующих отсеков; 2 — суммарная для отсеков (I — II) и III; 3 — суммарная для отсеков (II — III) и I; 4 — суммарная для отсеков (I — II) и (II — III)

Проведенный анализ и расчеты позволяют сделать лишь качественные выводы, не прибегая к их математическому обобщению, ибо, по нашему мнению, в настоящее время еще окончательно не вскрыта природа потерь энергии при взаимодействии отсеков потоков, движущихся с различными скоростями. Опубликованные ранее результаты различных экспериментальных исследований явления взаимодействия потоков не могут служить базой для сравнительной оценки роли участвующих в процессе взаимодействия факторов, поскольку не вполне доказано, что в этих опытах перетекание было устранено, хотя исследователи и стремились обеспечить прямолинейность и параллельность осей потоков.

В настоящее время наши исследования и работы Д. Е. Скородумова [8], выполненные по натурным наблюдениям, дают основание считать, что основным источником уменьшения пропускной способности русел являются затраты энергии на поперечное перемещение масс жидкости из одного отсека потока в другой, а потери энергии на «свободную турбулентность» значительно меньше, чем это предполагалось в ранее опубликованных работах.

Общее уменьшение пропускной способности потока при взаимодействии его отсеков в условиях поперечного перемещения масс жидкости и с резко отличной шероховатостью по ширине значительно. По лабораторным данным, оно достигает 30% и более по отношению к расходу, измеренному до взаимодействия отсеков потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуль А. Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах. Госэнергоиздат, М.-Л., 1963.
2. Барышников Н. Б., Пропускная способность русла с различной шероховатостью по ширине. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
3. Барышников Н. Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
4. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
5. Денисенко И. Д. К расчету канала с профилем различной шероховатости. Межвед. сб. Гидравлика и гидротехника, № 1—4. Изд. «Техника», Киев, 1966.
6. Железняков Г. В. Гидрометрия. Изд. «Колос», М., 1964.
7. Рось У. С. Некоторые вопросы гидравлики в русле с неоднородной шероховатостью. Автореферат дисс. Новосибирск, 1966.
8. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. Тр. ГГИ, вып. 128, 1965.
9. Факторович М. Э. Гашение энергии при соударении потоков, и перспективы его использования. Тр. Координационных совещаний по гидротехнике, вып. VII Госэнергоиздат, М.—Л., 1963.
10. Pillai C. R. Composite rugosity coefficient in open channel flow. Irrigata and Power. Vol. 19, № 3, 1962.
11. Jassin A. M. Mean roughness coefficient roughness of bed and side walls. Zürich, verlay, Leeman, 1953.

К ВОПРОСУ О КВАДРАТИЧНОМ ЗАКОНЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Накопление знаний о квадратичном законе сопротивления шло от признания эмпирических формул Шези для открытых потоков и Вейсбаха-Дарси для труб:

$$v = C \sqrt{RI}, \quad (1)$$

$$h_t = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (2)$$

Структура этих формул такова, что заранее предполагает наличие квадратичной связи потерь напора h_t или гидравлического уклона I со средней скоростью движения потока. Формулы эти просты, удобны в употреблении и быстро получили широкое распространение. Однако они были получены опытным путем и не имели теоретического обоснования, больше того, они находились в явном противоречии с признанным тогда в гидродинамике законом. Паузейля. Позже, в 1883 г., О. Рейнольдс [5] сделал первую попытку анализа режима потока в круглой трубе и на основе его смог связать линейный закон сопротивления с ламинарным движением, а квадратичный — с турбулентным. Таким образом, опыты Рейнольдса дали некоторое физическое обоснование формулам Шези и Вейсбаха—Дарси, ограничив пределы их применимости областью развитого турбулентного движения.

Остановимся на исследованиях Рейнольдса несколько подробнее. О. Рейнольдс, анализируя результаты своих исследований, а также опытные данные Дарси и Паузейля, нанес их на график в координатах $\lg v = f(\lg i)$ и получил две серии линий, одна из которых соответствовала ламинарному, а другая — турбулентному режиму движения. Зависимости в каждой серии дифференцировались по величине диаметра трубы d . Уравнение прямых, полученных Рейнольдсом, в общем виде можно записать следующим образом:

$$\lg i = n \lg v + \lg a, \quad (3)$$

где n — тангенс угла наклона линий связи;

a — отрезок, отсекаемый линией связи на оси абсцисс.

Основное отличие двух серий линий в том, что они имели различный угол наклона к оси абсцисс. Прямые, соответствующие ламинарному движению, имели угол наклона, равный 45° , и, следовательно, $n = 1$; вторая серия линий, соответствующая турбулентному

движению, имела значительно меньший угол наклона, но изменяющийся в некотором интервале, и потому n получилось переменное от 1,79 до 2,00. Можно предположить, что такое отклонение от квадратичного закона, полученное в отдельных опытах, связано с тем, что в этих трубах не была достигнута вполне развитая турбулентность. Однако с этим трудно согласиться, так как диапазон исследования охватывает очень широкую область уклонов и скоростей течения; в которой скорость достигает 5—10 м/сек, а уклон больше 100‰.

Применим формулу Вейсбаха-Дарси к анализу результатов Рейнольдса. В логарифмических координатах ее можно записать в следующем виде:

$$\lg i = 2 \lg v + (\lg \lambda - \lg d - \lg 2g). \quad (4)$$

Сравнивая формулы (3) и (4), отмечаем, что коэффициент 2 перед $\lg v$ есть не что иное, как n , а выражение в скобках можно обозначить через $\lg a$. Величина этого выражения, согласно формуле (4), учитывает характер поверхности стенки и диаметр трубы d . Попутно отметим, что связь коэффициента сопротивления λ с относительной шероховатостью $\frac{\Delta}{R}$ (параметр, обратный относительной «гладкости» $\frac{R}{\Delta}$, где Δ — высота выступов шероховатости, R — гидравлический радиус) в настоящее время считается доказанной. Такой суммарный учет этих двух параметров в виде отрезка, отсекаемого линией связи на оси абсцисс, почти не дает возможности отдельно учесть влияние шероховатости стенки на связь v с i . Однако все же Рейнольдс отмечает, что определенному виду шероховатости стенок трубы соответствует свое значение n . И потому, анализируя результаты опытов Рейнольдса, было бы логично предположить, что величина относительной шероховатости будучи различной для разных типов труб могла оказать влияние на характер связи v с i , т. е. на величину коэффициента n .

Таким образом, опыты Рейнольдса не могли еще служить бесспорным доказательством существования квадратичного закона сопротивления для всего диапазона относительной шероховатости. Необходим был дополнительный, более глубокий анализ новых опытных исследований. Однако развитие вопроса в дальнейшем сложилось так, что попытки анализировать опытные данные в координатах, предложенных Рейнольдсом, не предпринимались, но зато много работ было посвящено исследованию коэффициента сопротивления, его связи с шероховатостью стенки и числом Рейнольдса. Первая обстоятельная попытка анализа опытных данных в координатах $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{R}{\Delta}\right)$ принадлежит

И. Никурадзе [4], которому в специальных опытах в круглых трубах удалось показать, что при достаточно больших значениях чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления λ не зависит от Re и, следовательно, от скорости потока, а зависит лишь от относительной шероховатости стенки $\frac{\Delta}{R}$, т. е. ему удалось подтвердить существование квадратичного закона. Несколько позже А. П. Зегжда [2] провел систематические исследования закона сопротивления в открытых потоках и, проанализировав результаты своих опытов в тех же самых координатах, показал существование области квадратичного сопротивления для них. После

Зегжда изучением закономерностей гидравлического сопротивления в открытых потоках занимался еще целый ряд авторов. Можно назвать работы В. Р. Лозанского, Е. Е. Овчарова, А. А. Маастик, И. А. Родионова, Ю. К. Фогеля, О. М. Айвазяна, В. И. Ефремова и др. При этом обработка опытных данных производилась, как правило, в координатах $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{R}{\Delta}\right)$. Интересно отметить, что такой анализ в некоторых

случаях приводил к отклонению от квадратичного закона в той области чисел Re , где он должен был бы иметь место. А именно, в том месте на графике Зегжда, где связь λ с Re должна была быть прямолинейной, т. е. должен существовать квадратичный закон, получалось либо монотонное убывание зависимости, либо «горбы» или «впадины». Объяснение такого отклонения связывалось с влиянием уклона или числа Фруда, а также с тем, что в области повышенной шероховатости возможно существование каких-то особых закономерностей. Однако

сам по себе анализ опытных данных в координатах $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{R}{\Delta}\right)$

исключает возможность ввести в рассмотрение четвертый (дополнительный) параметр i или Fg , так как в число Re уже входят значения скорости и гидравлического радиуса. Подобные возражения против ставшей традиционной обработки опытных данных в координатах

$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{R}{\Delta}\right)$ уже высказывались в работе О. М. Айвазяна [1].

Здесь будет уместно заметить, что предложенные в свое время координаты Рейнольдса для обработки опытных данных являются более перспективными и могут внести некоторую ясность в вопрос об отклонениях от квадратичного закона, отмеченных рядом исследователей. Действительно, попытаемся построить для плоского открытого потока серию графиков вида (3)

$$\lg i = n \lg v + \lg a.$$

Для построения таких зависимостей воспользуемся данными, которые получены В. И. Ефремовым при проведении опытов в лотках ЛГМИ в 1962—1965 гг. [3]. Лотки имели прямоугольную форму, стенки их были стеклянные, дно имело характер равномерной зернистой шероховатости. Нанесем опытные данные, относящиеся к условиям плоского движения, на график в координатах $\lg v = f(\lg i)$ отдельно для каждого вида исследуемой шероховатой поверхности. Один из таких графиков, построенный для серии VI опытов, в которых шероховатость образовывалась гравием со средним диаметром $d = 4 \text{ мм}$ ($t_{\text{воды}} = 20^\circ\text{C}$), представлен на рис. 1.

Анализ графика показывает следующее.

1. Все поле точек довольно четко можно разделить на две области, граница между ними на рис. 1 показана пунктирной линией. Точки, лежащие слева от нее, образуют серию параллельных линий с тангенсом угла наклона от $n = 1$ до $n = 2$, т. е., согласно опытным данным, зависимость между v и i из прямолинейной по мере наполнения русла и соответственно повышения величины относительной гладкости переходит к квадратичной. При значительной величине параметра $\frac{R}{\Delta}$ опытные точки ложатся примерно на единую линию связи для обеих областей.

2. Рассмотрение опытных данных в координатах $\lg v = f(\lg i)$ дает возможность построить на поле графика изолинии чисел Re и Fr . Нижнее критическое число Re для открытого потока, согласно рекомендациям А. П. Зегжда, может быть принято равным $\approx 900-1000$. Изолиния числа $Re = 1000$ расположена в самом низу рис. 1, следовательно, можно считать, что все поле опытных точек относится к турбулентному движению. Сравнение изолинии числа $Fr = 1$ и граничной пунктирной линии показывает, что переход из одной области в другую (имеются в виду две области, отмеченные в пункте 1) наблюдается при скользящем значении числа Fr . Причем в потоках малого наполнения этот переход наблюдается при значениях числа Fr , значительно меньших единицы, т. е. в условиях спокойного режима. Этот вывод качественно совпадает с тем, который был получен в опытах Страуба, Зильбермана и Нельсона.

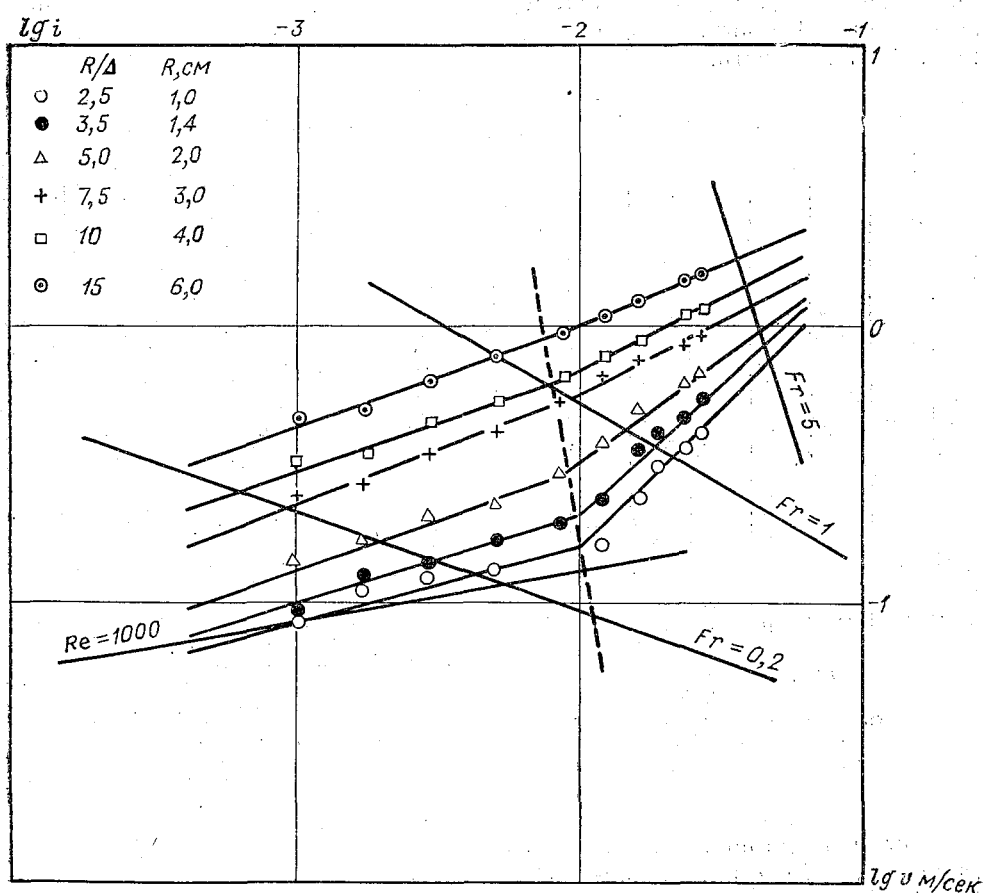


Рис. 1. График зависимости $\lg v = f(\lg i)$ по данным опытов В. И. Ефремова

Подсчитаем для всех точек пересечения граничной линии и линии связи величину числа Fr . Назовем его условно «переходным» числом Фруда и построим график связи $Fr_{пр} = \varphi\left(\frac{R}{\Delta}\right)$. Для VI серии опытов

В. И. Ефремова этот график представлен на рис. 2. Кроме данных Ефремова, на этот график нанесены еще четыре опытные точки, полученные в том же самом лотке по результатам опытов, выполненных автором в 1967 г. под руководством В. И. Полтавцева. По точкам на рис. 2 можно провести прямую линию связи, аналитическое выражение которой записывается в виде $Fr_{пр} = \frac{R}{10\Delta}$.

Величина $Fr_{пр}$ дает, очевидно, ту границу, которая характеризует изменение закономерности гидравлического сопротивления. Теперь для области $Fr > Fr_{пр}$ построим график зависимости $n = \psi\left(\frac{R}{\Delta}\right)$. Для этого предварительно с рис. 1 для каждой из сходящихся линий связи снимем тангенс угла наклона, т. е. определим величину n . График такого вида для VI серии опытов Ефремова и опытов автора 1967 г. представлен на рис. 3. Опытные точки на рис. 3 группируются вдоль криволинейной зависимости.

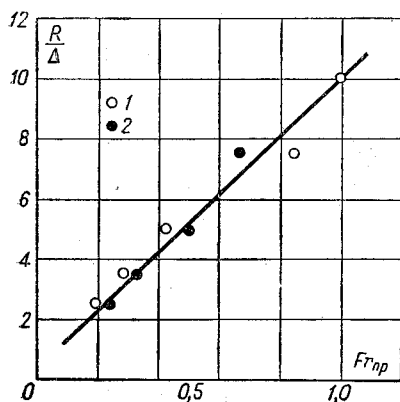


Рис. 2. График связи

$$Fr_{пр} = \varphi\left(\frac{R}{\Delta}\right):$$

1 — серия VI опытов В. И. Ефремова;
2 — опыты автора 1967 г.

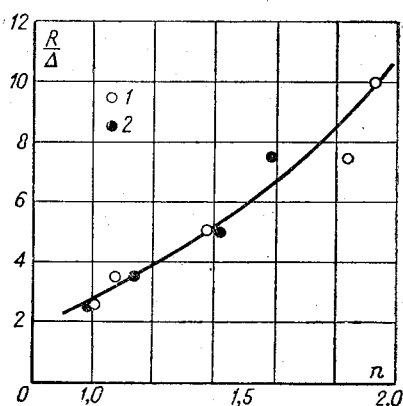


Рис. 3. График связи $n = \psi\left(\frac{R}{\Delta}\right)$

для области чисел $Fr > Fr_{пр}$:
1 — серия VI опытов В. И. Ефремова;
2 — опыты автора 1967 г.

Была предпринята также попытка построить совмещенный график вида $\lg v = f(\lg i)$ для опытов А. П. Зегжда и пяти опытных серий В. И. Ефремова, отличающихся некоторыми условиями проведения опытов и величиной выступов шероховатости, а также для одной серии опытов, проведенной в 1967 г. При этом на поле графика были нанесены точки, соответствующие одному и тому же значению гидравлического радиуса, но с различной величиной относительной шероховатости. Интересно отметить, что и на этом графике наблюдались отмеченные выше особенности, правда, менее ясные, чем на графиках, построенных для каждого водотока в отдельности. В значительной степени это объясняется недостаточным количеством опытных данных.

Выводы

1. Анализ опытных данных в координатах $\lg v = f(\lg i)$, предложенных в свое время Рейнольдсом, является, очевидно, весьма перспективным, так как он позволяет довольно четко установить границы существования квадратичного закона сопротивления, а также проследить, как изменяется этот закон во всей области турбулентного движения.

2. Попытка проанализировать в указанных выше координатах данные, относящиеся в основном к потокам с повышенной шероховатостью, подтвердила наблюдавшееся и раньше обстоятельство [1, 3], а именно: в области турбулентного режима для потоков повышенной шероховатости квадратичный закон сопротивления нарушается. Характер связи v с i для этой области представлен на рис. 3. Объяснение физической сущности данного явления, очевидно, следует искать в особом поведении пристенного подслоя для потоков с $\frac{R}{\Delta} < 10$.

3. Построение в дальнейшем графиков типа рис. 2 и 3 будет иметь, очевидно, важное практическое значение, поскольку мы часто имеем дело с расчетными формулами, которые предполагают существование квадратичного закона сопротивления для всей области относительных шероховатостей русла. Указанные выше зависимости дадут возможность ограничить область распространения этого закона, а также покажут характер его изменения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян О. М. Современная теория гидравлического сопротивления русел и опытные данные. Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, № 4, 1964.
2. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Госстройиздат, Л.-М., 1957.
3. Полтавцев В. И., Ефремов В. И. Об особенностях гидравлического сопротивления открытых потоков при большой шероховатости русла. Тр. ЛГМИ, вып. 25, 1967.
4. Сборник «Проблемы турбулентности», ОНТИ НКТП СССР, М.-Л., 1936.
5. Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and the law of resistance in parallel channels. Phil. Trans. of the Royal society of London, v. 174, 1883.

РАЗДЕЛ III

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

И. А. АРБУЗОВ

К МЕТОДИКЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЕРТУШКИ ПРИ ЗАПИСИ ПРОФИЛЯ ДНА ЭХОЛОТОМ

Известно [1], что одним из существенных недостатков эхолотов, производящих непрерывную запись профиля дна на бумажной ленте, является непостоянство горизонтального масштаба записанного профиля. Вариация скорости промерного плавучего средства приводит не только к изменению масштаба эхограмм на различных профилях, но и к изменению масштаба в различных точках одной и той же эхограммы. Если в первом случае лишь затрудняется обработка серии промеров, то во втором случае возникают ошибки в определении координат характерных глубин.

При координировании эхолотных промеров георезическими методами и нанесении на эхограмму оперативных отметок в моменты производства засечек на мензуре или теодолитом уменьшается влияние непостоянства скорости промерного судна. Однако это усложняет процесс эхолотирования профиля дна.

Весьма заманчивым является эхолотный промер без инструментальных засечек, но не «свободным ходом», а с отметками пройденного расстояния на эхограмме. На промерном плавучем средстве, у которого нет путепрокладчика, в качестве датчика пройденного пути может быть использована гидрометрическая вертушка. Действительно, для прямолинейного участка тарифовочной кривой вертушки имеет место соотношение

$$\bar{u} = kn; \quad (1)$$

где $\bar{u}$ — средняя скорость перемещения вертушки в бассейне;
 k — гидравлический шаг лопастного винта;
 n — число оборотов лопастного винта в секунду.

Умножая правую и левую части уравнения (1) на время перемещения вертушки, получим

$$L = kN, \quad (2)$$

т. е. пройденный путь пропорционален общему числу оборотов лопастного винта гидрометрической вертушки. Изложенное позволяет применять гидрометрическую вертушку в водоемах с малыми скоростями течения.

На промерном судне устанавливается гидрометрическая вертушка, ось которой параллельна диаметральной плоскости судна и поверхности воды. При движении плавучего средства оператор эхолота при замыкании контактов вертушки нажимает кнопку «оперативная отметка».

Процесс нанесения оперативных отметок на эхограмме может быть автоматизирован при использовании схемы, изображенной на рис. 1. В электрическую цепь вертушки вместо звонка или лампочки включается реле, контакты которого соединены параллельно кнопке «оперативная отметка». Если контакты вертушки замыкаются через 20 оборотов, то расстояние между оперативными отметками $L_{о.о.} = 20k$ и координаты характерных глубин на профиле легко находятся интерполяцией этого расстояния. Следует при этом иметь в виду, что скорость движения промерного судна должна быть больше критической скорости вертушки.

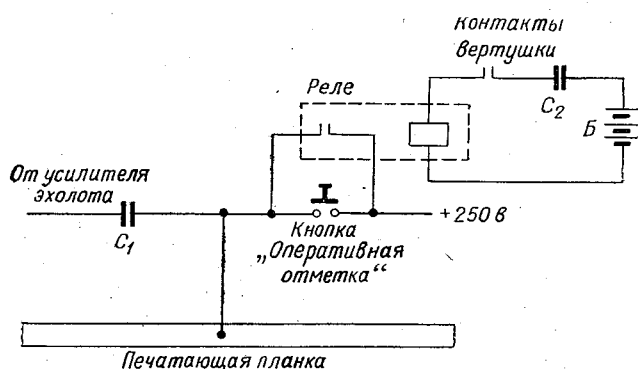


Рис. 1. Схема для автоматизации процесса нанесения оперативных отметок на эхограмму

Этот способ определения пройденного расстояния может быть распространен и на равнинные реки, если промерный ход располагается косым галсом.

При таком методе измерения наряду с инструментальными погрешностями гидрометрической вертушки могут иметь место методические погрешности, вызываемые:

а) составляющими скорости поверхности течения воды вдоль и поперек профиля;

б) изменением величины гидравлического шага в зависимости от места установки вертушки на промерном плавучем средстве и характера его движения.

Величина гидравлического шага вертушки и составляющая скорости поверхностного течения вдоль профиля могут быть определены при прохождении судном в прямом и обратном направлениях какого-либо известного расстояния L .

Пусть при движении судна в одну сторону гидрометрическая вертушка сделала N_1 оборотов, а при движении в обратном направлении N_2 . Положим (для определенности) $N_1 > N_2$. Это расхождение появляется, очевидно, из-за наличия составляющей скорости v_t поверхности течения вдоль профиля.

$$L + v_t \tau_1 = k_{эфф} N_1, \quad (3)$$

$$L - v_T \tau_2 = k_{\text{эфф}} N_2, \quad (4)$$

где τ_1 и τ_2 — время движения судна в прямом и обратном направлениях;

$k_{\text{эфф}}$ — эффективный гидравлический шаг лопастного винта с учетом места установки вертушки на судне и характера его движения.

Из уравнений (3) и (4) можно найти

$$k_{\text{эфф}} = \frac{L}{N_1 \tau_2 + N_2 \tau_1} (\tau_1 + \tau_2). \quad (5)$$

Это постоянное значение $k_{\text{эфф}}$ может быть использовано для определения пройденных расстояний и, следовательно, горизонтального масштаба эхограммы.

Величина средней скорости поверхностного течения может быть найдена по формуле

$$v_T = k_{\text{эфф}} \frac{N_1 - N_2}{\tau_1 + \tau_2}. \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), длина L при этом не имеет значения. Это обстоятельство может быть использовано для измерения средней скорости поверхностного течения на интересующем участке при прохождении его в прямом и обратном направлениях. Измерение составляющей скорости поверхностного течения вдоль профиля может быть произведено любым другим известным способом (вертушкой, поплавками и т. д.).

Для исключения случайных ошибок в определении величины $k_{\text{эфф}}$ прохождение мерного расстояния следует произвести несколько (5—6) раз и определить среднюю величину $k_{\text{эфф}}$ по формуле

$$k_{\text{эфф}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_{\text{эфф}i}, \quad (7)$$

где m — число измерений;

$k_{\text{эфф}i}$ — найденная величина эффективного гидравлического шага вертушки при i -том измерении.

Наличие составляющей поверхностного течения или ветра поперек галса, как показали испытания, отрицательно сказывается на точности измерения из-за наличия угла дрейфа промерного судна.

Действительные расстояния между горизонтальными линиями на эхограмме определяются по формуле

$$L_{0.0} = 20 k_{\text{эфф}} \pm v_T \tau, \quad (8)$$

где τ — время движения судна между оперативными отметками.

Величина τ может быть найдена без специального измерения непосредственно из эхограммы, вертикальный масштаб которой постоянен

$$\tau = \frac{l_{0.0}}{v_{\text{эх}}},$$

где $l_{0.0}$ — расстояние между оперативными отметками на эхограмме;
 $v_{\text{эх}}$ — скорость протяжки эхограммы.

При движении судна против течения знак в формуле (8) берется положительный, а по течению — отрицательный.

В таблице представлены результаты испытаний гидрометрической вертушки ГР-21М заводской № 380 ($k = 0,215$ м/оборот по свидетельству о тарировке № 57118). Гидрометрическая вертушка была установлена на штанге у борта весельной лодки на глубине 0,3 м и расстоянии от борта 0,25 м. Пройденное расстояние определялось плавучей цепью длиной 215 м с разметкой через 8,6 м марками-поплавками.

Как видно из данных таблицы, при движении лодки со скоростями от 0,75 до 1,82 м/сек и средней скорости поверхностного течения 0,04 м/сек $k_{эфф} = 0,215 \pm 0,002$ м/оборот и совпадает с точностью до 1% с k вертушки по свидетельству о тарировке.

Таблица

Результаты испытаний гидрометрической вертушки ГР-21М

i	τ_i , сек	N_i , оборот	$\tau_i + \tau_{i+1}$, сек	$N_i \tau_{i+1} + N_{i+1} \tau_i$, оборот сек: 1%	L_i , м	$k_{эфф_i}$, м/оборот	v_c , м/сек	v_T , м/сек
1	↑ 190	1040	355	350	214	0,217	1,18	0,06
2	↓ 165	940	315	322	214	0,214	1,24	0,07
3	↑ 150	1040	270	272	215	0,214	1,50	0,05
4	↓ 120	980	420	419	214	0,215	1,82	0,03
5	↑ 300	1040	524	521	215	0,216	0,75	0,03
6	↓ 224	960	404	406	215	0,214	0,92	0,04
7	↑ 180	1040	360	364	216	0,214	1,25	0,04
8	↓ 180	980	360	360	215	0,215	1,17	0,02
9	↑ 180	1020	345	345	215	0,215	1,25	0,02
10	↓ 165	980	—	—	215	—	1,17	—

Примечание. Стрелки ↑ и ↓ обозначают движение лодки против ветра и по ветру соответственно.

Выводы

1. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при изменении скорости движения судна не наблюдается изменения величины гидравлического шага вертушки.

2. При указанном методе измерения координат характерных глубин на галсе методические ошибки могут возникнуть только от изменения величины скорости поверхностного течения вдоль профиля. При малой величине скорости поверхностного течения и большой скорости промерного судна указанные погрешности будут малы.

3. Изложенное позволяет считать целесообразным использование гидрометрической вертушки для определения пройденного расстояния на профиле при производстве промерных работ эхолотом. Этот метод может быть также использован при других гидрометрических работах, где требуется определение координат места.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быков В. Д. и Васильев Н. В. Гидрометрия. Гидрометеиздат, Л., 1965.
 2. Туманов В. В. Речные и озерные изыскания. «Речной транспорт», Л., 1960.
-

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Дальность действия гидроакустического канала связи должна быть достаточной для обеспечения установления контакта передающего и регистрирующего комплексов в пределах навигационной точности счисления, при этом излучающие и приемные устройства автономных гидрологических систем должны иметь диаграммы направленности, близкие к сферическим [1]. В этом случае в качестве электроакустических преобразователей целесообразно применить пьезокерамические цилиндры с высотой, меньшей длины волны в окружающей среде. Современные методы технической навигации позволяют определить с точностью до трех кабельтовых, [4] но дальность действия канала связи должна быть не менее протяженности зоны тени, которая возникает при использовании пьезокерамических цилиндров и зависит от углубления преобразователя и гидрологического режима в районе постановки. Как показывают расчеты, для большинства случаев использования канала связи в автономных гидрологических системах эта дальность действия должна быть не менее 2000 м. Определение необходимой дальности действия системы в свою очередь позволяет правильно оценить акустические параметры излучающих и приемных устройств.

Как известно [2], в точке приема

$$I_{\text{пор}} = \frac{P_a \gamma}{4\pi r^2 \cdot 10^{10}} 10^{-0,1\beta r}. \quad (1)$$

Здесь $I_{\text{пор}}$ — пороговая интенсивность в точке приема, вт/см^2 ;

r — дальность действия, км ;

γ — коэффициент концентрации излучателя;

β — коэффициент пространственного затухания, дб/км ;

P_a — мощность излучения, вт .

Определим реально достижимую дальность действия для пьезокерамического цилиндрического излучателя. Расчеты проводились для рабочей частоты канала связи $f_0 = 30 \text{ кгц}$ для трех значений полосы пропускания приемного тракта $\Delta f = 25, 250 \text{ и } 1500 \text{ гц}$, при этом считалось, что $\gamma = 1$ и $\beta = 5,5 \text{ дб/км}$. Величина $I_{\text{пор}}$ рассчитывались по спектральным характеристикам шумов различного происхождения для этих же полос пропускания и рабочей частоты (таблица).

Таблица

Результаты расчетов

$r, \text{ км}$	$\Delta f, \text{ гц}$	$\frac{Pa'}{I_{\text{пор}}}$	$I_{\text{пор}}, \text{ вт/см}^2$	$Pa, \text{ вт}$	$u_{\text{возб}}, \text{ в}$
2	25	10^{13}	$3,28 \cdot 10^{-15}$	0,0328	—
	250		$1,94 \cdot 10^{-15}$	0,0197	
	1500		$13,7 \cdot 10^{-15}$	0,137	
3	25	$7 \cdot 10^{13}$	$3,28 \cdot 10^{-15}$	0,2300	—
	250		$1,97 \cdot 10^{-15}$	0,1380	
	1500		$13,7 \cdot 10^{-15}$	0,960	
5	25	$4 \cdot 10^{15}$	$3,28 \cdot 10^{-15}$	13,1	200—700
	250		$1,97 \cdot 10^{-15}$	7,9	
	1500		$13,7 \cdot 10^{-15}$	55,0	
7	25	$8 \cdot 10^{16}$	$3,28 \cdot 10^{-15}$	262	900—1100
	250		$1,97 \cdot 10^{-15}$	157	
	1500		$13,7 \cdot 10^{-15}$	1100	

Максимальная интенсивность излучения может ограничиваться несколькими факторами: механической прочностью преобразователя, его электрической прочностью, электрической прочностью системы держатель—вибратор—среда, кавитацией у поверхности преобразователя, прочностью металлических электродов и т. п. Каждый из этих факторов сложен и недостаточно изучен; их влияние можно оценить ориентировочно.

При получении мощных ультразвуковых колебаний амплитуда их становится настолько большой, что в принципе возможно разрушение преобразователя. Для грубой оценки порядка величины интенсивности из линейной акустики и что закон Гука выполняется вплоть до разрушения. На резонансе максимальная интенсивность будет

$$I_{\text{max}} = \frac{(\rho c)_{\text{ср}}}{2} \left(\frac{\pi c_1 E_{\text{max}}}{E_{\text{Ю}}} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь E_{max} — предел механической прочности пьезокерамики (для ЦТС $E_{\text{max}} = \text{кг/см}^2$);

$E_{\text{Ю}}$ — модуль Юнга.

В этом случае $I_{\text{max}} = 40^4 \text{ вт/см}^2$.

Таким образом, механическая прочность керамики не ограничивает повышение интенсивности, так как эта интенсивность значительно превышает экспериментально достигнутую. Электрический импеданс керамики мал и для его возбуждения требуется относительно низкое напряжение, которое недостаточно для возникновения электрического пробоя. Электрическая прочность керамики ЦТС, например, составляет

5 кв/мм, т. е. этот фактор, по-видимому, также не может оказать существенного влияния на верхний предел интенсивности излучения. Аналогичные рассуждения относительно роли остальных факторов приводят к выводу, что основным фактором, определяющим максимально допустимую интенсивность излучения, является кавитация. Кавитация значительно снижает эффективность излучения, облегчает электрический пробой, приводит к уменьшению электрической мощности из-за уменьшения волнового сопротивления среды, потерь на кавитацию и рассеяние звука. В связи с тем что допустимая удельная акустическая мощность определяется кавитацией, представляют интерес ожидаемые величины $I_{\max}$ и $P_{\max}$.

В настоящее время нет единого мнения о зависимости интенсивности, достаточной для возникновения кавитации, от глубины погружения излучателя. Так, Д. Шофилд [3] приводит следующую зависимость:

$$I_{\max} = 0.3 (0.1H + 1.8)^2, \quad (3)$$

где $I_{\max}$ — интенсивность излучения, вт/см^2 ;

H — глубина погружения излучателя, м.

Для глубин порядка 50—100 м интенсивность достигает таким образом 15 вт/см^2 . В свою очередь, существует выражение для акустического давления на глубине H для случая непрерывного излучения гармонических колебаний при отсутствии кавитации

$$P_{\max} = \pm (1 + 0.1H), \quad (4)$$

здесь $P_{\max}$ — давление, атм;

H — глубина, м.

Тогда величина интенсивности может быть получена по выражению

$$I_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\max}^2}{\rho c} 10^7, \quad (5)$$

для глубин 50—100 м она равна 13 вт/см^2 . Если учесть разрушаемость пьезопреобразователя при высоких интенсивностях излучения, то необходимо ограничиться величиной порядка 5—8 вт/см^2 . Так как

$$P_a = \int_0^S I_{\max} dS \quad (6)$$

и высота цилиндра обычно не превышает 3—4 см при ненаправленном излучении, то акустическая мощность не превысит 150—200 вт, т. е. реально достижимая дальность действия канала связи подобного типа достигает 5—6 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чверткин Е. И. К расчету ненаправленности действия электроакустических преобразователей автономных гидрологических систем. См. настоящий выпуск.
2. Тюлин В. Н. Основные явления, связанные с распространением акустических волн в морской среде. Изд. ВМОЛА, Л., 1956.
3. Подводная акустика. Изд. ИЛ, М., 1965.
4. Frantz W. P., Dean W. N., Frank R. L. IRE Natl. Convention Record. Pt. 8, 79, 1957.

К РАСЧЕТУ НЕНАПРАВЛЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АУТОНОМНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одним из основных требований, предъявляемых к гидроакустическому каналу передачи информации в автономных гидрологических системах, является ненаправленность действия излучающих и приемных устройств. Это освобождает от необходимости предварительного активного поиска регистрирующего комплекса и позволяет осуществлять связь из любой точки в пределах дальности действия аппаратуры. Ненаправленность действия можно обеспечить, применяя электроакустические преобразователи сферической или цилиндрической форм, в качестве которых целесообразно использовать магнитострикционные или пьезокерамические преобразователи. Анализ параметров показывает, что вместе с рядом преимуществ (возможность создания звуковых импульсов высокой интенсивности, прочность и антикоррозийность конструкции) магнитострикционные преобразователи обладают низким электроакустическим к. п. д., уменьшающимся с ростом частоты. Они характеризуются низкой чувствительностью, их резонансная частота сильно зависит от температуры окружающей среды, требуется постоянное подмагничивание преобразователя. Частота вибраторов ограничена пределом 60 кГц и, наконец, изготовление их сложно и дорого. Преобразователи на основе пьезокерамики по некоторым своим параметрам и качествам превосходят магнитострикционные преобразователи. Они обладают высоким значением пьезоэффекта, поэтому для создания механических колебаний необходимой амплитуды требуются относительно небольшие напряжения возбуждения. Свойства пьезокерамики дают возможность изготовить преобразователи необходимых размеров и любой геометрической формы. Подобные излучатели при обычных условиях могут создавать интенсивности порядка 5—7 Вт/см² и более в зависимости от состава применяемого материала. Коэффициент полезного действия достигает 50% и более и зависит от способа крепления преобразователя. Пьезокерамические приемники обладают высокой чувствительностью, зависимость резонансной частоты от температуры у некоторых составов керамики достаточно мала.

Таким образом, использование пьезокерамических элементов становится весьма привлекательным. В технике приборостроения нашли широкое применение сферические пьезопреобразователи, но их применение в автономных гидрологических системах пока не возможно в связи с рядом технологических трудностей их использования. Более приемлемым, с этой точки зрения, является использование пьезокерамических

преобразователей цилиндрической формы в качестве ненаправленных электроакустических преобразователей. Задача сводится к выбору таких параметров цилиндра, которые обеспечат необходимую характеристику направленности.

Как известно [1], диаграмма направленности преобразователя цилиндрической формы определяется выражением

$$R_{\gamma} = \sqrt{\frac{I_0^2 \left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \cos \gamma \right) + I_1^2 \left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \cos \gamma \right) \cos^2 \gamma}{I_0^2 \left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \right) + I_1^2 \left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \right)}} \cdot \frac{\sin \left(\frac{\pi h}{\lambda} \sin \gamma \right)}{\frac{\pi h}{\lambda} \sin \gamma} \quad (1)$$

Здесь I_0 и I_1 — функции Бесселя соответственно нулевого и первого порядка;

d_1 — диаметр цилиндра, см;

λ — длина волны, см;

γ — половина угла диаграммы направленности, град;

h — высота цилиндра, см.

Расчеты проводились для трех произвольно выбранных значений резонансных частот канала связи, выбранных из возможного диапазона рабочих частот: 30, 50 и 70 кГц, и для произвольных величин радиусов цилиндра: 0,5; 0,7 см. Результаты расчетов иллюстрируются графиками (рис. 1). На этом рисунке представлены зависимости диаграммы направленности от резонансной частоты и высоты цилиндра h . Очевидно, что по мере увеличения необходимой величины γ , верхний предел возможных рабочих частот гидроакустического канала связи не превышает 60 кГц. Высота цилиндра при этом не должна превышать 4 см.

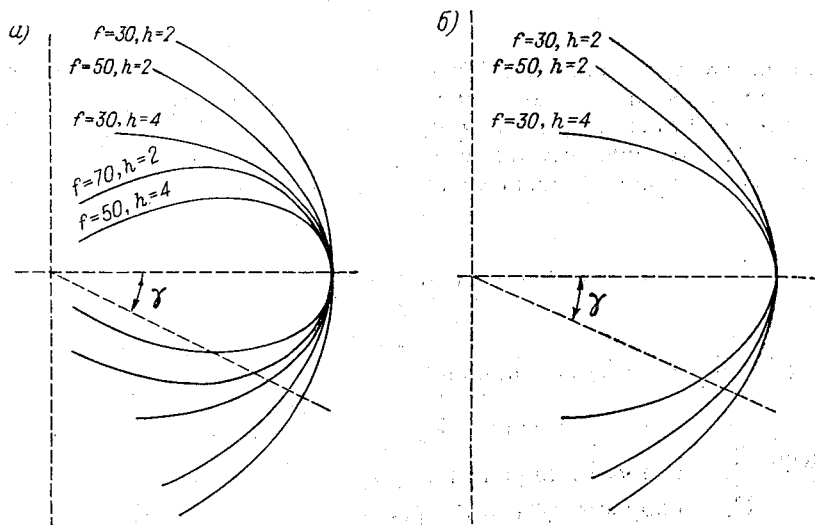


Рис. 1. Диаграммы направленности пьезоцилиндра:

а) — при $r_i = 0,5$ см; б) — при $r_i = 0,7$ см.

При увеличении высоты цилиндра и его резонансной частоты направленность данного пьезопреобразователя резко возрастает, что хорошо подтверждается кривыми (на рис. 1). Выбирая соответствующие линейные размеры цилиндра, можно обеспечить практически любую степень ненаправленности пьезовибратора.

На основании вышеизложенного хорошо видно, что цилиндрические преобразователи обладают тем существенным недостатком, что имеют зону тени, расположенную по оси цилиндра. Величина зоны тени зависит не только от диаграммы направленности, но и от глубины погружения преобразователя и гидрологических факторов в районе постановки. Для выяснения общей картины реального перекрытия водной среды звуковым полем достаточно будет рассмотреть два варианта использования аппаратуры и гидроакустическим каналом связи. В первом случае оба преобразователя (приемник и излучатель) углублены до 50—100 м. Во втором случае один из преобразователей углублен на 50—100 м, второй же расположен вблизи грунта. Естественно, что характер зоны тени в обоих случаях будет различным для конкретных районов Мирового океана. Распространение звуковых волн в море чрезвычайно сильно осложняется благодаря слоистому строению вод, т. е. благодаря тому, что и температура и соленость морской воды меняется как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. В результате непрерывно изменяется и важнейшая гидроакустическая характеристика — скорость звука. Предполагая непрерывное распределение скорости звука с глубиной, можно получить так называемый закон Снеллиуса для слоисто неоднородной среды

$$\cos X_0 = n(z) \cos X_z, \quad (2)$$

где X — угол скольжения, т. е. угол между касательной к лучу и горизонтальной плоскостью;

$n(z)$ — показатель преломления, зависящий от глубины,

$$n(z) = \frac{C_0}{C_z}.$$

Из анализа выражения (2) видно, что изменение скорости звука с глубиной приводит к изменению угла между касательной к лучу и горизонтальной плоскостью. Если предположить излучатель с координатами $(0, z)$, что горизонтальное расстояние, проходимое лучем от излучателя к точке приема, расположенной на уровне z , будет

$$r = \pm \cos X_0 \int_{z_0}^z \frac{dz}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 X_0}}, \quad (3)$$

так как X_z связан с X_0 соотношением

$$C(z) \cos X_0 = C_0 \cos X_z. \quad (4)$$

Здесь C_0 — скорость звука на уровне излучателя;

C_z — скорость звука на уровне z .

Рассмотрим среду, скорость звука в которой убывает с глубиной, как наиболее часто встречающуюся ситуацию. Для определенности положим это изменение линейным, т. е.

$$C(z) = C_0 [1 - \delta(z - z_0)], \quad (5)$$

где $\delta = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{dC}{dz}$ — относительный градиент скорости звука.

Зоны тени в этом случае будут иметь вид, представленный на рис. 2.

При отрицательной рефракции угол скольжения луча, вышедшего вверх, будет уменьшаться и может оказаться равным нулю. Это зависит от X_0 и δ . При $z < z_0$ и при отсутствии полного внутреннего отражения уравнение звукового луча будет иметь вид

$$r = -\cos X_0 \int_{z_0}^z \frac{[1 - \delta(z - z_0)] dz}{\sqrt{1 - [1 - \delta(z - z_0)]^2 \cos^2 X_0}}. \quad (7)$$

С учетом формул (2) и (5) получаем

$$r = \frac{1}{\delta \cos X_0} (\sin X_0 - \sin X_z), \quad (7)$$

где

$$\sin X_z = \sqrt{1 - [1 - \delta(z - z_0)]^2 \cos^2 X_0}. \quad (8)$$

При $z > z_0$ уравнение луча будет

$$r = \frac{1}{\delta \cos X} (\sin X_z - \sin X_0). \quad (9)$$

Для определения протяженностей зон тени, создаваемых цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями, необходимо знать условия распространения звуковой энергии в различных районах Мирового океана. Соответствующие расчеты проводились для зон А, В и С, указанных на рис. 2, при этом задавались значения $R_T = 0,7$ и $2\gamma = 120^\circ$. Расчеты показывают, что при углублении преобразователей до глубин 500—1000 м протяженность зон А и С незначительна и на практике может не приниматься во внимание. Таким образом, можно считать, что применение пьезокерамических преобразователей цилиндрической формы в качестве ненаправленных излучателей и приемников вполне оправдано, и поэтому можно отказаться от применения вибраторов более сложной формы.

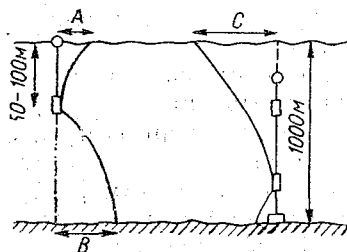


Рис. 2. Зоны тени цилиндрических пьезопреобразователей

ЛИТЕРАТУРА

1. Попилов Л. Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Гостехиздат М.-Л., 1963.
2. Лысанов Ю. П. Теоретические основы гидроакустики. МВО, М., 1965.
3. Матаушек И. Ультразвуковая техника. ИЛ, М., 1962.

И. Л. КАЛЮЖНЫЙ

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯМИ И ТЕРМОЭЛЕМЕНТАМИ

Одним из основных показателей теплового обмена приземного слоя атмосферы и торфяной залежи является ее температура. Температура поверхности и залежи болота определяет протекание важнейших гидрофизических и биологических процессов. Суть этих процессов освещена в ряде отечественных и зарубежных работ.

Главным условием изучения температурного режима торфяной залежи являются круглосуточные высокоточные наблюдения температуры на стандартных глубинах, а также точная регистрация глубины распространения тепловой волны в суточном и годовом ходе теплооборота.

В настоящее время на сети болотных станций Гидрометслужбы основными приборами для изучения температуры залежи являются жидкостные термометры. Область их применения в практике работ болотных станций определена наставлениями гидрометеорологическим станциям и постам [6, 7]. Для изучения ряда процессов тепломассообмена применение этих приборов приводит к существенным погрешностям и не удовлетворяет требования проведения точного эксперимента в природе.

В настоящей работе приведены результаты разработки новых дистанционных приборов для изучения температурного режима торфяной залежи. Эти приборы не являются принципиально новыми, применяются в различных конструктивных исполнениях в гидрометеорологии и агрофизике, но в болотоведении применяются впервые и показывают хорошие результаты.

Чувствительными элементами (датчиками) наших приборов являются полупроводниковые термосопротивления. Впервые они были применены в болотоведении В. В. Романовым [8]. Существенным достоинством полупроводниковых датчиков является их большой температурный коэффициент. Это открывает широкие перспективы в создании дистанционных приборов.

Для дистанционного автоматического измерения температуры по глубине торфяной залежи нами была применена установка, изготовленная на базе 12-точечного электронного потенциометра ЭПП-08М. Схема установки показана на рис. 1. Установка состоит из неравновесного моста с потенциометром, в качестве регистратора и датчиков закладываемых в торфяную залежь. Неравновесный мост рассчитывается по методу М. А. Каганова [2]. При этом выбор диапазона измерения опре-

деляется возможной амплитудой колебания температуры. В нашем случае диапазон температур 0—25°C. Точность измерения составляла 0,1°. Сопротивления плеч моста r_1 — r_4 намотаны на гетенаксовом каркасе проводом ПЭММ-0,1. Гальванометр М-194 служит для установки рабочего тока и дублирования системы при профилактических осмотрах потенциометра. Гальванометр включается в схему неравновесного моста при помощи тумблера T . Для согласования неравновесного моста с потенциометром применен шунт $r_{ш}$. Сопротивление r_1 включается на вход потенциометра к клеммам подключения датчиков. Сопротивление взято из расчета, что при максимальном отклонении стрелки гальванометра, каретка потенциометра устанавливается на последнее деление шкалы. В процессе работы при автоматическом включении его производится контроль за изменением рабочего тока неравновесного моста. Запись рабочего тока позволит осуществить коррекцию измерения температуры при отклонении рабочего тока от нормы. Если значение рабочего тока N делений шкалы, а измененное значение N_1 , то определив коэффициент отклонения от нормы f по формуле

$$f = \frac{N}{N_1}, \quad (1)$$

получим истинную температуру

$$t = f t_1, \quad (2)$$

где t_1 — значение температуры при N_1 .

Метод такой коррекции возможен при отклонении рабочего тока в пределах 20% от нормы. Коррекция установки рабочего тока осуществляется переменным сопротивлением Π_2 . С целью стабилизации напряжения питания моста производится от щелочных аккумуляторов. Неравновесный мост подключен к клеммам 7,6 колодки № 1 потенциометра [11]. Датчики температуры присоединяются к неравновесному мосту через многоточечный переключатель Π потенциометра. В качестве датчиков температуры используются термосопротивления типа ММТ-4 с номинальным сопротивлением 3,9 ком. Перед применением термосопротивления отбраковывают и искусственно состаривают согласно методике, описанной в работе [10]. После этого подбирают термисторы, близкие по номиналу.

При измерении температуры необходима полная гидроизоляция термистров. С этой целью была изготовлена специальная прессформа, состоящая из двух симметричных латунных секций. Для гидроизоляции термистров сырую резину нарезают полосами шириной 2—3 мм, наматывают на термистор и резиновую трубку с подводящими проводами. Обе части прессформы стягиваются винтами. Вулканизация производится при температуре 120°C в течение часа. Для предотвращения прилипания резины к стенкам прессформы вулканизируемая деталь покрыва-

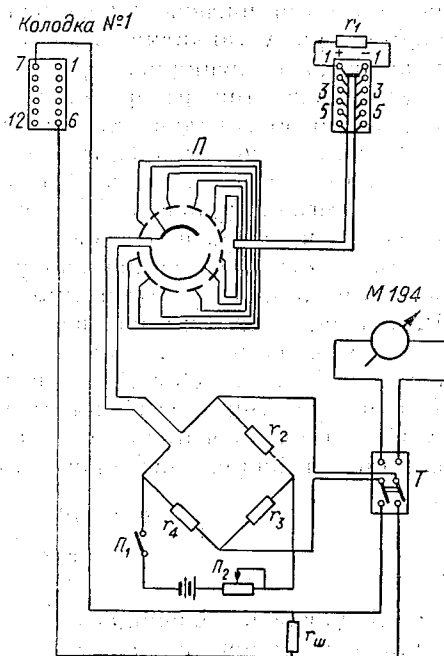


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной приставки для измерения температуры торфяной залежи к многоточечному потенциометру ЭПП-09М

вается калькой. Гидроизоляция термистров может быть выполнена тиоколовым герметиком У-30М. В работе [4] приведены основные физико-механические свойства резин из тиоколового герметика, методика приготовления и области применения. В форму для вулканизации тиоколовый герметик вводят шприцами различных конструкций. Для покрытия тонким слоем пасту разбавляют толуолом или метилэтилкетон и наносят кистью. В качестве адгезионного надслоя применяется хлорнаиритовый грунт или клей К-50. Вулканизация происходит без подогрева в течение 24 час., после чего герметик приобретает свойства резины. При нагреве вулканизация ускоряется. Завулканизированные термисторы устанавливаются на стандартных глубинах. Датчики подключаются к специальному соединительному боксу, а затем кабелем к установке. При выборе марки кабеля учитывают условия эксплуатации и способ укладки его на болоте. При этом лучшим способом следует считать укладку кабеля в специальном коробе или подвеску его на столбиках высотой 0,8—1,0 м.

На выбор марки кабеля оказывает значительное влияние изменение его сопротивления в процессе эксплуатации при повышенной влажности. Так, кабель из полиизобутиленовой изоляции и хлорвинила в течение года изменил сопротивление изоляции более чем на 2000 Ом. Изменение сопротивления изоляции кабеля Ru' может быть существенным источником понижения точности измерения при применении термосопротивлений с большими номинальными значениями $R_{T_{20}}$ и высокими температурными коэффициентами β . Как показано в работе [1], если величина $R_{T_{20}}$ соизмерима с сопротивлением изоляции линии, то максимальная ошибка передачи δ при этом определяется по формуле

$$\delta = \frac{d^2 R_{T_{20}} (\beta + Ru) (Ru' - Ru)}{\varphi Ru^2 (dR_{T_{20}} + Ru')} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Задавшись величиной δ и зная основные параметры линии передачи и их изменения во времени, определяем номинальное значение термосопротивления, при применении которого ошибка передачи не будет превосходить максимального значения. С целью избежания ошибки передачи нами были использованы термисторы с $R_{T_{20}}$ менее 10 ком. Для подключения датчиков применен кабель КСРБ (в свинцовой оболочке, бронированный двумя стальными лентами с защитным наружным слоем).

Недостатком установки является сравнительно небольшой диапазон регистрируемых температур. Применяя метод точечного интерполирования, по методике М. А. Каганова диапазон измеряемых температур возможно расширить вдвое, оставив ту же точность измерения. При этом выгодно использовать схему, в которой ток в измерительной диагонали моста может иметь два направления. Тогда длина шкалы и чувствительность прибора возрастет в два раза. В этом случае каждый датчик установки имеет свой измерительный мост, который включается на вход потенциометра при первом диапазоне — на одну пару клемм в прямом, а при втором диапазоне — на следующую пару клемм в обратном положении с переменной полюсов.

Таким образом, общий диапазон измерения температуры расширен до 50°C. Схема прибора приведена на рис. 2. Для установки рабочего тока каждый мост отключается от потенциометра тумблерами $P_5 - P_n$. При помощи переключателя ПМТ в измерительную диагональ моста включается гальванометр М-194. Включив соответствующие контрольные сопротивления $r_{k_1} - r_{k_3}$ тумблерами $P_9 - P_{11}$, устанавливают ра-

бочий ток каждого в отдельности моста. Контроль за изменением питания мостов в процессе работы осуществляется отдельным мостом с постоянным сопротивлением R_k . Мосты питаются от батареи щелочных аккумуляторов.

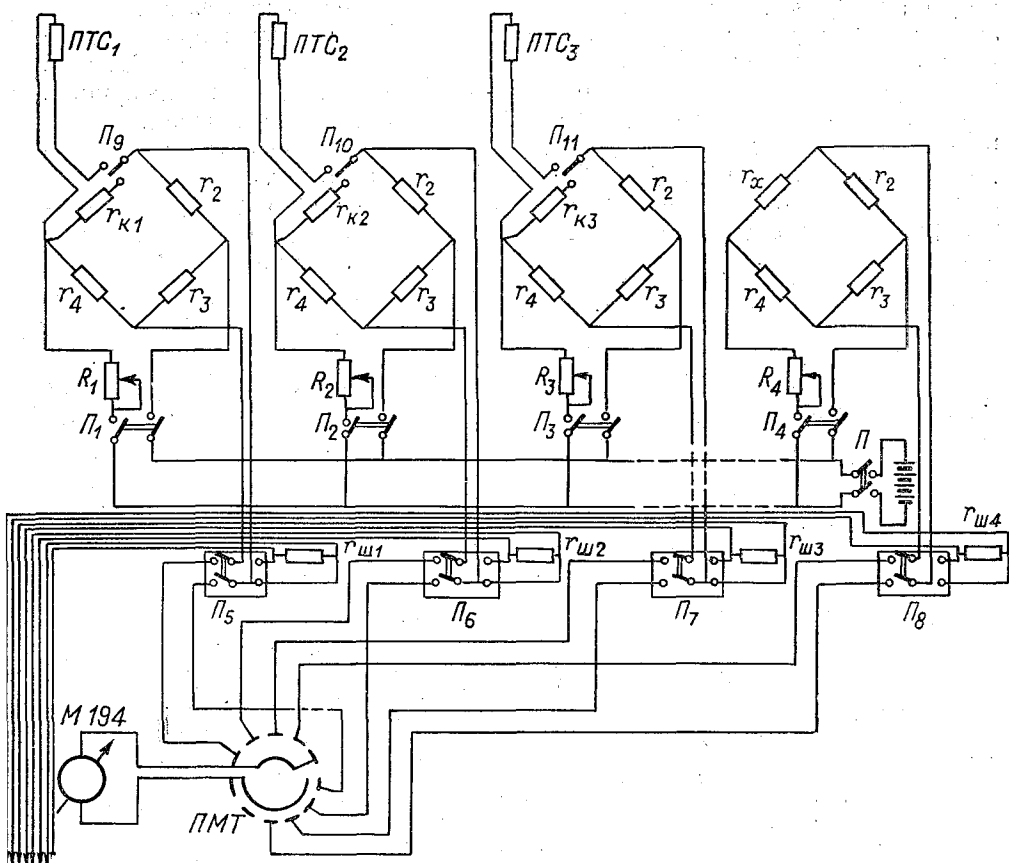


Рис. 2. Принципиальная схема дистанционной автоматической самопишущей установки для измерения температуры залежи с расширенным диапазоном измерения

Обе дистанционные установки позволяют регистрировать температуру залежи автоматически в течении 10—15 суток. Скорость протяжки диаграммной ленты при этом может быть от 20 до 180 мм/час.

При исследовании температурного режима исследователю зачастую бывает достаточно нескольких измерений в течение суток. В этом случае нами применялась дистанционная установка с системой коммутации датчиков на шаговых искателях и автоматического цифрового моста Р-336 в качестве регистратора. Принципиальная схема установки приведена на рис. 3. Установка состоит из пульта регистратора, установленного в помещении станции, и коммутатора с датчиками, установленного на болоте.

Работает установка следующим образом: на пульте регистратора нажатием кнопки K_1 посылаются импульсы тока на два шаговых искателя пульта и коммутатора. Шаговый искатель коммутатора подключает к измерительному мосту датчик температуры. При включении опре-

деленного датчика на пульте загорается соответствующая ему индикаторная лампочка $L_1 \dots L_{12}$. Тумблером T_1 включается общее напряжение в 30 в, при этом загорается контрольная лампочка L_k . Контроль за износом щеток шагового искателя осуществляется на отдельной закороченной паре ламелей шагового искателя коммутатора. По закороченной паре ламелей проверяют и согласование всей системы измерений. Для согласования системы включают на пульте регистратора тумблер K и путем посылок импульсов тока систему согласовывают. Система коммутации питается от отдельного выпрямителя. При использовании автоматического равновесного моста Р-336 рабочее напряжение, подаваемое на измерительный мостик, чрезвычайно велико для термисторов и вызывает их разогрев. Нами был несколько изменен блок питания моста и рабочее напряжение было уменьшено до 3,5 в, регистратор работал вполне устойчиво. Достоинством подобной установки является ее простота и значительная экономия в кабеле.

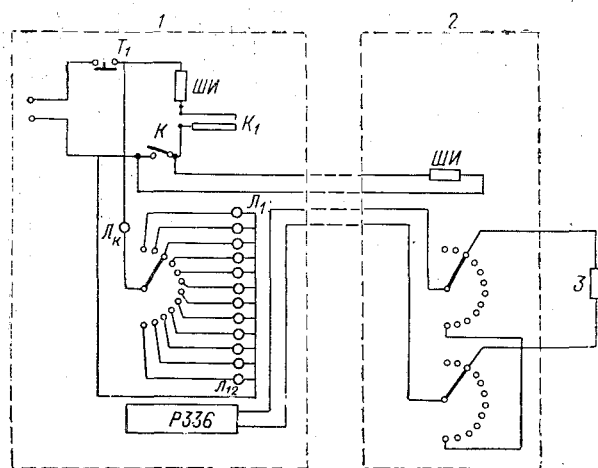


Рис. 3. Дистанционная установка для измерения температуры залежи с системой коммутации:
1 — пульт регистратора; 2 — коммутатор; 3 — датчики

При гидрофизических исследованиях в некоторых случаях возникает необходимость в измерении осредненной температуры поверхности болота. Нами был использован способ электрического осреднения посредством включения многих термоэлементов на один регистратор [3]. Конструктивно прибор выполнен из 11 последовательно соединенных между собой медно-константановых термопар, образующих термобатарею. Горячие концы термопар помещены в специальную полихлорвиниловую трубку. Концы горячих спаев покрываются водонепроницаемым лаком и укладываются на поверхности почвы. Холодные концы термопар помещают в резиновую трубку длиной 4 м совместно с полупроводниковым термометром сопротивления. Резиновая трубка с холодными спаями гидроизолируется. Термостатирование холодных спаев осуществляется путем установки их в те горизонты залежи, где отсутствует суточный ход температуры. Во всех наших работах холодные спаи уста-

навливались на глубинах ниже 0,8 м от поверхности. Из-за разности температур холодного и горячего спая в термопарах возникает результирующая э. д. с., равная

$$v_n = \sum_{n=1}^{n=N} (t_n - t_0) c, \quad (4)$$

где N — общее количество термоэлементов;

t_n — температура измерительного (горячего) спая в град.;

t_0 — температура холодного термоспая в град.;

c — чувствительность термоспая в мв/°С.

Формула справедлива для термобатарей при условии, что зависимость $v_n - f(\Delta t)$ имеет линейный характер. Для медно-константановых термопар формула справедлива в диапазоне температур, встречающихся при гидрофизических исследованиях на болотах. Регистратором э. д. с. был использован электронный потенциометр ЭПП-09М с пределом измерения 0—10 мв. Для согласования датчика с потенциометром применен шунт, рассчитанный по формуле

$$R_{ш} = \frac{R}{\frac{cnT_{\max}}{v} - 1}, \quad (5)$$

где $R_{ш}$ — сопротивление шунта в омах;

R — сопротивление датчика в омах;

$T_{\max}$ — диапазон измеряемых температур в град.;

v — диапазон шкалы потенциометра в мв.

При линейной шкале потенциометра, равной $\eta = 100$ делений, и диапазоне температуры $T_{\max}$ цена деления d в °С/дел. равна

$$d = \frac{T_{\max}}{\eta}. \quad (6)$$

Зная температуру холодных спаев t_0 и цену деления d , получаем температуру измерительного спая по формуле

$$t_n = t_0 + d\eta', \quad (7)$$

где η' — число делений по записи на ленте потенциометра.

Для расширения диапазона измерения применено встречное включение датчика. На правую пару клемм многоточечного потенциометра датчик включается в прямом положении, а на другую пару в обратном с переменной полярности. Это дает возможность расширить диапазон измеряемых температур в два раза. Термистор для измерения температуры холодного спая включается в измерительную схему неравновесного моста.

Дистанционные установки позволяют регистрировать температуру с точностью до 0,1°С, фиксировать суточный ход теплооборота и являются вполне надежными приборами в экспериментальных исследованиях. Для применения их в качестве стандартных приборов на сети болотных станций необходимо было сравнить показания этих приборов с коленчатыми термометрами, установленными на глубинах 5, 10, 15, 20 см и вытяжными термометрами, установленными на глубинах 20, 40,

60, 80, 120, 160, 240, 320 см. Такие сравнения были выполнены в 1961, 1962 и 1966 гг. Датчики термометров устанавливались в непосредственной близости от жидкостных термометров. Разность в показаниях между термистрами и коленчатыми термометрами имеет отчетливо выраженный суточный ход с максимумом расхождений в 13 час для глубины 5 см. С глубины 20 см суточный ход разности отсутствует. В зависимости от температуры воздуха почасовая разница в показаниях температуры до глубины 40 см имеет как положительные, так и отрицательные значения. Особо отчетливо это выявляется в переходные сезоны года. Расхождения объясняются различными коэффициентами теплопроводности. Коэффициенты теплопроводности материалов, из которых изготовлены термометры и датчики температуры, несколько отличаются. Коэффициенты теплопроводности эбонита и резины равны 0,14, дерева 0,22, а стекла 0,64 ккал/м час °С [5]. Коэффициент теплопроводности сфагнового ошеса и торфа колеблется в широких пределах (от 0,05 до 0,65 ккал/м час °С) по глубине залежи и зависит от влажности и температуры [9]. Эти различия в коэффициентах теплопроводности вызывают значительные колебания измеряемой температуры как по величине, так и по фазе. В результате в течении суток и в сезонах года разница не бывает постоянной и изменяется в широких пределах.

Таблица 1

Среднедекадные разности температур (термосопротивления-коленчатые термометры), по наблюдениям Зеленогорской болотной станции в 13 час

Месяц	Декада	Глубина установки, см					
		1961 г.				1962 г.	
		5	10	15	20	5	20
Май	2					0,2	—0,2
	3					0,2	—0,1
Июнь	1					0,2	—0,2
	2					0,2	—0,2
	3					0,1	—0,2
Июль	1					0,2	—0,2
	2					0,0	0,0
	3					0,2	—0,1
Август	1	0,3	0,4	—0,2	—0,1	0,6	0,0
	2	0,4	—0,1	0,3	0,1	0,6	—0,2
	3	0,5	—0,1	0,2	0,1	0,7	0,1
Сентябрь	1	0,5	—0,2	—0,1	—0,1	0,6	0,0
	2	0,4	—0,2	—0,1	—0,1	0,2	0,5
	3	0,6	—0,1	0,0	—0,1		
Октябрь	1	0,4	—0,1	—0,1	—0,1		
	2	0,5	—0,1	0,0	—0,1		
	3	0,7	0,1	0,1	0,0		
Ноябрь	1	0,6	0,1	0,3	0,1		

В табл. 1 и 2 показаны среднемесячные и среднедекадные разности температуры, по наблюдениям Зеленогорской болотной станции в 13 час. Анализ данных этих таблиц показал, что вытяжные термометры завышают температуру довольно значительно (от 0,1 до 1,0°C и более). Коленчатые термометры на глубинах 10, 15, 20 см завышают температуры в значительно меньших пределах (от 0,1 до 0,3°C в теплый период года). В холодный период года термосопротивления регистрируют температуру несколько большую, чем ртутные термометры, так как вдоль стекла распространяется поток холода, искажающий истинное температурное поле. Переменная по величине и положительная по знаку разность температур на глубине 5 см может быть объяснима при правильной установке датчиков только запаздыванием максимума суточного хода температуры по резиновой трубке датчика.

Таблица 2

Среднемесячные разности температур (термосопротивления-вытяжные термометры) в срок 13 час за период наблюдения август — ноябрь 1966 г.

Месяц	Декада	Глубина установки, м							
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,4	3,2
Август	3	—0,7	—0,6	—0,8	—0,8	—0,5	—0,6	—0,7	—0,3
Сентябрь		—0,3	—0,3	—0,4	—0,8	—0,5	—0,8	—1,0	—0,2
Октябрь		—0,4	—0,4	—0,5	—0,8	—0,2	—0,5	—0,9	—0,1
Ноябрь	1	—0,6	—0,6	—0,8	—1,0	—0,2	—0,2	—0,9	—0,1

Таким образом, для продления рядов наблюдений за температурой залежи и ее увязки необходима длительная совместная эксплуатация жидкостных термометров и термистров. Только после этого с учетом гидрометеорологических факторов возможно продлить ряд наблюдений.

Выводы

1. Дистанционные установки позволяют регистрировать температуру залежи и поверхности болота. Отличаются сравнительной простотой и являются высокоточными приборами.
2. Установки могут быть применены как при специальных исследованиях так и при стационарных работах на сети болотных станций.
3. Для продления рядов наблюдений и привязки их к рядам наблюдений, полученных по жидкостным термометрам, необходимо определить разность расхождений в течение длительного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожух В. Я. О точности измерения температуры полупроводниковыми термосопротивлениями. Приборостроение, № 3, 1964.
2. Каганов М. А. К методике измерения температур с помощью термосопротивлений. Сборник трудов по агрономической физике, вып. 5, 1952.
3. Каганов М. А., Чудновский А. Ф. Прибор для измерения температуры поверхности почвы. Сборник трудов по агрономической физике, вып. 5, 1952.

4. Лабутин Л. Л., Федорова Н. С. Новые полимерные материалы, применяемые для гидроизоляции металлических поверхностей, расположенных на больших глубинах. Материалы к симпозиуму «Экспериментальные исследования инженерных сооружений» Л., 196.
 5. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, М.-Л., 1947.
 6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 8. Гидрометеоздат, Л., 1955.
 7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 3, ч. I. Гидрометеоздат, Л., 1968.
 8. Романов В. В. Испарение с болот Европейской территории СССР. Гидрометеоздат, Л., 1962.
 9. Романов В. В. Гидрофизика болот. Гидрометеоздат, Л., 1961.
 10. Шлимович Б. М. Метод контроля и повышения стабильности полупроводниковых термоспротивлений. Геофизическое приборостроение, вып. 6, 1960.
-

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I

ВОПРОСЫ ГИДРОФИЗИКИ

	Стр.
С. И. Дмитриев. Изменение интенсивности капиллярного испарения в зависимости от соотношения между радиусом и глубиной зоны испарения капилляра	3
Ю. С. Большакова, С. А. Юдовина. Экспериментальное исследование взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации в слоистых грунтах.	12
П. П. Ангелопуло. Состояние изученности процессов заторообразования	22
П. П. Ангелопуло. Влияние изгиба русла на процессы заторообразования.	39
С. Д. Винников. О средних скоростях в круговом цилиндрическом водовороте.	48
С. Д. Винников. О расчете поля скоростей в круговом цилиндрическом водовороте.	53
Юровская Т. Н. К вопросу о построении кривой падения температуры воды вдоль активной зоны водохранилища-охладителя.	63
С. Д. Винников, Т. Н. Юровская. Некоторые результаты натурных исследований водохранилища-охладителя Молдавской ГРЭС.	66

РАЗДЕЛ II

ГИДРАВЛИКА И ДИНАМИКА РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

Н. Б. Барышников. Влияние шероховатости поймы на транспорт наносов в основном русле (экспериментальная работа).	70
Н. Б. Барышников, А. В. Кокарев. К вопросу о влиянии формы сечения на пропускную способность русла.	80
Н. Б. Барышников, В. В. Виноградов. Сток взвешенных наносов рек бассейна Средней Оби.	89
Н. Б. Барышников. К определению максимальных расходов воды на реках с поймой.	100
Н. Б. Барышников, В. А. Розанов. Уменьшение пропускной способности русел с неоднородной шероховатостью по ширине.	108
В. А. Соколова. К вопросу о квадратичном законе сопротивления.	116

РАЗДЕЛ III

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

И. А. Арбузов. К методике использования гидрометрической вертушки при записи профиля дна эхолотом.	122
Е. И. Чверткин. К определению дальности действия гидроакустического канала связи.	127
Е. И. Чверткин. К расчету ненаправленности действия электроакустических преобразователей автономных гидрологических систем.	130
И. Л. Калужный. Измерение температуры торфяной залежи термосопротивлениями и термоэлементами.	134
	143

Изменение интенсивности капиллярного испарения в зависимости от соотношения между радиусом и глубиной зоны испарения капилляра. Дмитриев С. И. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 3—11.

В работе приводятся результаты анализа теоретической формулы для расчета интенсивности капиллярного испарения i , выведенной автором на основе решения пространственной задачи диффузии паров в зоне испарения капилляра. От обычно применяемого для расчета величины i уравнения диффузии одномерной задачи, предлагаемая формула отличается тем, что в нее входит теоретический безразмерный коэффициент $K > 1,0$. Этот коэффициент выражает характер изменения величины i от следующих факторов: соотношения между радиусом капилляра r_k и глубиной зоны испарения в нем l , граничных условий задачи, формы, поперечного сечения капилляра. Результаты анализа свидетельствуют о том, что формула согласуется с данными экспериментов. В частности, формулой подтверждается наличие обратнопропорциональной зависимости между радиусом капилляра и величиной i , а так же установлено, что для случаев, когда численные значения r_k и l сопоставимы между собой имеет место соотношение $K > 1,0$. Следовательно, в этих случаях нельзя рассматривать процесс диффузии паров в капилляре как одномерную задачу и использовать для расчета величины i соответствующее этой задаче уравнение диффузии.

Табл. 1. Илл. 3. Библ. 11.

УДК 628.365

Экспериментальное исследование взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации в слоистых грунтах. Большакова Ю. С., Юдовина С. А. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 12—21.

В предлагаемой статье приводится материал, полученный при лабораторном исследовании взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации на моделях анизотропных грунтов.

Вначале кратко рассматривается теория электроосмотической и гравитационной фильтрации в анизотропных средах А. В. Нетушила. Применяя эту теорию к экспериментальной модели слоистого грунта, авторы вычислили степень влияния анизотропии на усредненные по двум взаимоперпендикулярным направлениям параметры среды: удельную электропроводность, коэффициент фильтрации и коэффициент электроосмоса.

Опыты по исследованию взаимодействия электроосмотической и гравитационной фильтрации производились на электроосмометре с моделями грунтов, состоящими из чередующихся слоев кембрийской глины и мелкозернистого песка. Потоки фильтрации электроосмоса были направлены параллельно, а затем перпендикулярно плоскостям раздела слоев.

Результаты исследования показывают, что в слоистых грунтах электрическое поле не изменяет величины коэффициента фильтрации, независимо от того направлено ли оно перпендикулярно или относительно поверхностей раздела слоев грунта, а также совпадает ли оно или противоположно направлению гравитационного поля.

Табл. 5. Илл. 4. Библ. 10.

УДК 551.328+551.326

Состояние изученности процессов заторообразования. Ангелопуло П. П. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 28, стр. 22—38.

В статье приводится обзор литературы, посвященной заторам льда. Литература систематизирована по отдельным направлениям рассматриваемого вопроса: описательному, режимному, физическому, гидротехническому, прогностическому и методическому. В статье также приводится обзор работ, посвященных борьбе с заторами льда.

Библ. 90.

Влияние изгиба русла на процессы заторообразования. Ангелопуло П. П. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 39—47.

В статье рассматриваются вопросы образования заторов льда на изгибах русла, факторы, влияющие на этот процесс. Устанавливаются физические закономерности движения льда на изгибе и зависимость бокового давления льда от скорости его движения и соотношения радиусов кривизны берегов. Рассматривается энергетический баланс ледового материала при ледоходе.

Табл. 1. Илл. 3. Библ. 11.

О средних скоростях в круговом цилиндрическом водовороте. Винников С. Д. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 48—52.

В статье рассматривается вопрос о распределении средних скоростей по радиусу в круговом цилиндрическом водовороте, имеющих место, например, в водохранилищах — охладителях, нижних бьефах гидроузлов и других случаях. Выводится уравнение для расчета распределения средних скоростей по радиусу, параметры которого представлены в безразмерном виде. Приводится пример расчета выведенного уравнения методом конечных разностей. Результат расчета представлен в виде кривых распределения.

Илл. 2. Библ. 6.

О расчете поля скоростей в круговом цилиндрическом водовороте. Винников С. Д., Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 53—62.

Водовороты, наблюдающиеся в водохранилищах-охладителях, играют немаловажную роль в охлаждающей способности этих водохранилищ. Но механика водоворотов и их взаимодействие с транзитной струей до сих пор не ясны.

В настоящей статье анализируются существующие предложения в этом направлении и дается расчет поля скоростей для частного случая — кругового цилиндрического водоворота.

Приводится пример расчета поля скоростей, результат которого представлен в виде кривых распределения. Также приводится пример расчета расхода водообмена между транзитной струей и водоворотом.

Илл. 3. Библ. 18.

К вопросу о построении кривой падения температуры воды вдоль активной зоны водохранилища-охладителя. Юровская Т. Н. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 63—65.

Рассматривается применяемое в практических расчетах решение задачи о тепловом балансе водохранилища-охладителя с использованием метода конечных разностей. Путем введения общепринятых зависимостей применяемое выражение для определения активной площади водохранилища-охладителя приводится к виду, удобному для интегрирования. На основе результатов интегрирования предлагается новая зависимость для определения активной площади. Проведены проверочные расчеты по принятым номограммам и по вновь выведенной зависимости.

Библ. 1.

Некоторые результаты натурных исследований водохранилища-охладителя Молдавской ГРЭС. Винников С. Д., Юровская Т. Н. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 66—69.

В статье приведены данные о натурных исследованиях на водохранилище-охладителе Молдавской ГРЭС. Результаты анализа этих данных представлены в виде плана течений. Приведены также результаты сопоставления полученного плана течений с расчетным. Построением планов течений установлено наличие небольшого эллипсоидного водоворота, не оказывающего существенного влияния на охлаждающую способность водохранилища.

Илл. 2.

УДК 532.501.312+627.157

Влияние шероховатости поймы на транспорт наносов в основном русле (экспериментальная работа). Барышников Н. Б. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 70—79.

Экспериментами, проведенными в лаборатории ЛГМИ, было установлено, что в результате взаимодействия пойменного потока расходы наносов в основном русле уменьшаются по сравнению с аналогичным изолированным руслом. Величина указанного уменьшения расходов наносов находится в прямой зависимости от шероховатости поймы.

Основной причиной уменьшения расходов наносов в пойменных руслах является уменьшение русловых скоростей за счет поперечного перетекания масс жидкости и «свободной турбулентности». Далее, по данным опытов И. П. Спицына было установлено, что поле скоростей в основном русле деформируется под влиянием пойменного потока, что приводит к искажению распределения скоростей по глубине руслового потока, особенно значительному в припойменной части русла.

Эпюра скоростей по глубине руслового потока выравнивается. Величина отношения донной скорости к средней отклоняется от расчетной по существующим формулам (логарифмической, эллиптической, параболической и др.) в сторону увеличения. Это положение необходимо учитывать как при подсчете расходов наносов, так и при определении характера деформаций в потоках с поймой.

Для подсчета стока наносов на реках с поймой одновременно с кривыми $G_p(Q)$ и $G_p = f(H_p)$ рекомендуется строить кривые зависимости $G_p(v_p)$.

Табл. 1. Илл. 4. Библ. 8.

УДК 551.482.2+532.501.312

К вопросу о влиянии формы сечения на пропускную способность русла. Барышников Н. Б., Кокарев А. В. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 80—88.

Экспериментальным путем исследованы четыре формы составных русел (с односторонней и двухсторонней поймами и др.) с гладкими стенками.

Анализом экспериментальных данных установлено, что гидравлический радиус недоучитывает влияние формы сечения даже при наличии гладких тормозящих стенок. В сложносоставных руслах наблюдается существенное возрастание коэффициента сопротивления λ по сравнению с аналогичным для прямоугольных русел.

Кривые зависимости $\lambda = f(Re)$ для гладких ступенчатых русел располагаются выше соответствующих кривых для русел прямоугольной формы. При этом характер указанных кривых существенно отличается от аналогичных кривых для гладкого русла прямоугольной формы сечения.

Уменьшение пропускной способности составных русел, достигающее 20%, возрастание коэффициента сопротивления и изменение характера

кривых зависимости $\lambda = f(\text{Re})$ по сравнению с руслами простых форм объясняется эффектом турбулентного взаимодействия отсеков потока движущихся с различными скоростями и особенно поперечным перемещением масс жидкости.

Табл. 2. Илл. 4. Библ. 10.

УДК 627.157(571.14)

«Сток взвешенных наносов рек бассейна Средней Оби. Барышников Н. Б., Виноградов В. В. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 89—99.

Произведен анализ данных наблюдений за стоком взвешенных наносов по 60 станциям, расположенным в бассейне Средней Оби, за период наблюдений по 1962 г. По этим данным уточнена карта распределения средней мутности и нормы стока взвешенных наносов для указанного бассейна, опубликованные Шамовым Г. И. в 1956 г.

Было установлено, что на территории исследуемого бассейна расположено шесть зон мутности по классификации Шамова Г. И. Основные уточнения границ расположения зон охватывают, в основном, I—IV зоны мутности.

При уточнении норм стока взвешенных наносов установлено, что наибольшие отклонения от данных Шамова Г. И., достигающие 40—60%, получены по рекам: Кеть, Каргат, Вах, Томь и др.

Изменчивость годового стока взвешенных наносов на исследуемой территории, характеризуемая коэффициентом вариации, колеблется от 0,13 до 0,77, значение коэффициента асимметрии может быть принято равным $2C_v$.

Табл. 4. Илл. 5. Библ. 15.

УДК 627.15

«К определению максимальных расходов воды на реках с поймой. Барышников Н. Б. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38 стр. 100—107.

По данным детальных измерений расходов воды на реках Птичь и Словечна произведен анализ методов подсчета стока при уровнях затопления поймы. Вскрыты ошибки принятых методов расчета, заключающиеся в игнорировании влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потока на характер кривых зависимости $Q(H)$ и $v(H)$ при выходе воды на пойму. Приведены рекомендации по построению кривых расходов воды на пойменных створах.

Табл. 2. Илл. 3. Библ. 10.

УДК 532.501.312

«Уменьшение пропускной способности русел с неоднородной шероховатостью по ширине. Барышников Н. Б., Розанов В. А. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 108—115.

Работа посвящена анализу опытных данных, полученных на экспериментальной установке, на которой была смонтирована модель плоского русла с тремя различными шероховатостями по ширине.

Эксперименты осуществлялись как при изолированных отсеках потока с однородной шероховатостью, так и при их взаимодействии, в условиях перетекания масс жидкости из одного отсека потока в другой.

Выполненный анализ экспериментальных данных, а также анализ работ других исследователей позволил установить, что основным источником уменьшения пропускной способности русел с различной шероховатостью по ширине при взаимодействии потоков являются затраты энергии на поперечное перемещение масс жидкости из одного отсека потока в другой, а потери энергии на «свободную турбулентность» значительно меньше, чем это предполагалось в ранее опубликованных работах.

Общее уменьшение пропускной способности потока при взаимодействии его отсеков с резко различной шероховатостью по ширине в условиях поперечного перемещения масс жидкости, значительно. По нашим данным оно достигает 30% и более по сравнению с расходом воды в условиях изоляции отсеков потока и зависит от глубины.

Табл. 3. Илл. 3. Библ. 11.

УДК 532.501.312

К вопросу о квадратичном законе сопротивления. Соколова В. А. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 116—121.

Приводятся результаты анализа экспериментальных данных для потоков повышенной шероховатости в координатах, предложенных в свое время Рейнольдсом. Такой анализ позволяет установить границы существования квадратичного закона сопротивления, а также проследить как изменяется этот закон в области вполне развитого турбулентного движения.

Делается попытка довести полученные выводы до возможного практического использования.

Илл. 3. Библ. 5.

УДК 627.133+551.460.18

К методике использования гидрометрической вертушки при записи профиля дна эхолотом. Арбузов И. А. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 122—126.

Изменение скорости промерного плавучего средства приводит к вариации горизонтального масштаба эхограммы. Для сохранения преимуществ «свободного хода» и уменьшения ошибок в определении характерных глубин на профиле в качестве датчика пройденного пути относительно поверхности воды может быть использована гидрометрическая вертушка, при замыкании контактов которой наносятся оперативные отметки на эхограмме. Ошибки при этом возникают лишь из-за изменения скорости поверхностного течения.

Табл. 1. Илл. 1. Библ. 2.

УДК 534.88+551.460.18

К определению дальности действия гидроакустического канала связи. Чверткин Е. И. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 127—129.

В статье теоретически определяется дальность действия гидроакустического канала связи в случае использования в качестве электроакустических преобразователей полых цилиндров из пьезокерамики (ЦТС или ВаТ О₃). Рабочая частота для определенности выбиралась равной 30 кгц, величины пороговой интенсивности для произвольно выбранных полос пропускания приемно-усилительного тракта определялись по спектральным характеристикам суммарных помех различного происхождения. Оценивалась максимальная интенсивность излучения для керамических полых цилиндров. Полученные результаты позволяют ориентировочно определить акустическую мощность и напряжение возбуждения для достижения необходимой дальности действия канала связи предложенной структуры.

Табл. 1. Библ. 4.

УДК 534.88+551.460.18

К расчету ненаправленности действия электроакустических преобразователей автономных гидрологических систем. Чверткин Е. И. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 130—133.

В статье даются рекомендации по выбору типа и формы электроакустических преобразователей для приемных и излучающих устройств канала связи. Проводится анализ диаграммы направленности в зависимости

от частоты и геометрических размеров преобразователя, выполненного в виде полого цилиндра. В связи с наличием зоны тени, расположенной по оси цилиндра, определяются зоны тени для некоторых районов Мирового океана в зависимости от гидрологических условий в районе использования гидроакустического канала связи. В статье даются рекомендации о предельных глубинах использования канала связи с цилиндрическими электроакустическими преобразователями.

Илл. 3. Библ. 3.

УДК 631.436+534.5

Измерение температуры торфяной залежи термосопротивлениями и термоэлементами.
К а л ю ж н ы й И. Л. Труды ЛГМИ, 1969, вып. 38, стр. 134—142.

Предложен дистанционный прибор для изучения температурного режима торфяной залежи. Предлагаемый прибор может быть применен как при специальных исследованиях, так и при стационарных работах на сети болотных станций.

Табл. 2. Илл. 3. Библ. 11.

Редактор И. Г. Максимова

М 15829

Подп. к печати 9.09.69

Объем $9\frac{5}{8}$ печ. листов

Зак 269

Типография ВОК

Тираж 500 экз.

(цена 1 р. 26 к.)

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000

100-1000