

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЭССР
ЭСТОНСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

А. А. МААСТИК

ИССЛЕДОВАНИЕ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ
ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ
ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

ИЗДАНИЕ
ЭСТОНСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ
ТАРТУ — 1959

131741

X
-4500 II

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЭССР
ЭСТОНСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

А. А. МААСТИК

ИССЛЕДОВАНИЕ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ
ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ
ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

1959

ИЗДАНИЕ
ЭСТОНСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКАДЕМИИ
ТАРТУ — 1959

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

131741

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о сопротивлении движению воды в турбулентных потоках имеет более чем столетнюю историю, но остается актуальным и до настоящего времени. Поскольку не существует ясного представления о механизме турбулентности и строгого теоретического изложения его, приходится прибегать к экспериментальным исследованиям для выяснения интересующих нас практических вопросов.

Если закономерности сопротивления движению воды в напорных трубах довольно хорошо изучены (работы Прандтля-Кармана-Никурадзе, исследования Кольбрука и Уайта, Шевелева и др.), то вопрос о сопротивлениях при движении воды в открытых руслах является все еще мало изученным. Главной причиной этому, по-видимому, является трудоемкость и громоздкость постановки соответствующих экспериментов.

При движении воды в открытых руслах добавляется ряд факторов, обычно не встречающихся при напорном течении в трубопроводах: присутствие свободной поверхности, существование в потоке взвешенных материалов, отличие поперечного сечения от круглого, существование двух различных состояний потока — спокойного и бурного — в зависимости от уклона русла, наличие намного более разнообразной шкалы шероховатостей в открытых водотоках и т. д.

Из-за отсутствия достаточных знаний о факторах, определяющих закономерности движения воды в открытых руслах, принимается, что закономерности течения в трубах применимы и к открытым руслам, если диаметр трубы заменять через гидравлический радиус открытого потока.

К уточнению этого предположения и выяснению закономерностей сопротивления в открытых руслах в последнее время был поставлен ряд экспериментальных исследований, как опыты Раю [1] и Аллена [2] в гладких прямоугольных лотках, Зегжда [3, 4] в прямоугольных руслах равнозернистой шероховатости, Роджерса [5] и Оуэна [6] в треугольных лотках с гладкой и песчаной поверхностями, Пауэлла [7] в гладком прямоугольном лотке и лотке с регулярной шероховатостью, Варвика [8] в гладких и шероховатых (песчаная шероховатость) рус-

лах, Овчарова [23] в лотках с песчаной шероховатостью, Марки [10] в бетонных лотках треугольного и трапециoidalного сечений и др.

Все перечисленные исследования были проведены в различное время и в различных условиях. Для систематического изучения факторов, влияющих на сопротивление движению воды в открытых руслах, были поставлены описываемые в данной статье опытные исследования. Задача исследований состояла в том, чтобы охватить в одних и тех же условиях возможно больший диапазон различных факторов, влияющих на сопротивление движению воды в открытых руслах (характер поверхности русла, форма поперечного сечения и степень кинетичности потока — число фруда) и исследовать следующие вопросы:

1) Закономерность сопротивления в гидравлически гладких руслах разной формы поперечного сечения;

2) характер кривых $\lambda = f(\text{Re})$ при $R = \text{const.}$ в руслах песчаной шероховатости (как равнoзернистой, так и неравнoмерного характера) и технической шероховатости (бетонной);

3) влияние формы поперечного сечения на сопротивление движению воды при одинаковом гидравлическом радиусе потока;

4) закономерность сопротивления при бурном состоянии потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В соответствии с поставленной задачей в гидравлической лаборатории Московского института инженеров водного хозяйства имени В. Р. Вильямса (МИИВХ) в 1957—1958 гг. были проведены опыты по исследованию открытых потоков треугольного, трапециoidalного и параболического сечений. Треугольное и трапециoidalное русла испытывались с четырьмя различными видами шероховатости: гладкая поверхность (стекло), техническая шероховатость (бетон), равнoзернистая песчаная шероховатость со средним диаметром песка $d_{cp} = 1,1$ мм и песчаная шероховатость неравнoмерного характера. Параболическое русло исследовалось с равнoзернистой песчаной шероховатостью ($d_{cp} = 1,1$ мм) и гладкое (белая жесь).

Для проведения указанных опытов был использован большой зеркальный лоток гидравлической лаборатории МИИВХ (рис. 1). Основные размеры лотка: длина 15,10 м, ширина 600 мм, высота в верхней части (длиной 6,10 м) 950 мм, в нижней части 750 мм. Питание осуществлялось следующим образом. Из бассейна вода центробежным насосом подавалась в бак постоянного напора, отсюда вода поступала в успокоительный бак 1 в голове лотка и затем в лоток 2, откуда сливалась в успокоительный колодец 3, затем через решетки 4 в лоток мерного водослива 5 и дальше через измерительный прямоугольный водослив с острым ребром 6

по сливному каналу 7 обратно в бассейн. Напор над гребнем водослива 6 определялся по пьезометру 8, причем отсчеты производились с помощью мерной иглы. Температура воды замерялась термометром 9.

Так как зеркальный лоток имел нулевой уклон, в него был встроен опытный лоток 10, уклон которого изменялся при помощи подъёмных винтов в пределах от $i_0 = 0$ до $i_0 = 0,032$. Конструкция опытного лотка показана на рис. 1. Опорная часть 11, на которой монтировались исследуемые лотки (каналы), была подвешена на 9 основных (через 1,5 м) и 5 дополнительных (расположенных между основными на протяжении измерительного участка) опорах 12 из швеллера № 10. Подвеска каждой поперечной опоры осуществлялась помощью двух подъёмных винтов 13 закрепленных подъёмными гайками 14 на швеллерах 15, опирающихся на борта 16 зеркального лотка.

Для исследования были приняты следующие формы поперечных сечений (рис. 1): треугольная с углом 90° , трапециoidalная шириною по дну 10 см и заложением откоса 1 : 1 и эквивалентная этой трапеции параболическая (квадратическая парабола с параметром $p = 18$ см). Поперечные размеры моделей были продиктованы шириной зеркального лотка. Дном для трапециoidalного сечения служила опорная часть лотка, борта готовились из деревянных щитов 17 длиной 3 метра. Щиты опирались на деревянные укосины 18 через каждые 1,5 метра. Низ щитов крепился к опорной части шурупами. Постоянная ширина поверху поддерживалась клиньями вставленными между бортом модели и стеклом зеркального лотка. Для треугольного сечения были использованы те же боковые щиты, сдвинутые к оси лотка. Для создания необходимой шероховатости внутренняя поверхность деревянных лотков облицовывалась соответственно опытам стеклом (гладким или покрытым песком) или бетонными щитами.

Параболическая модель (рис. 2) состояла из четырех секций длиной по 3 м каждая, изготовленных заранее и смонтированных на опорной части лотка. Каждая секция представляла собой деревянный каркас, построенный по шаблону, к которому крепились облицовка из белой жести толщиной 0,5 мм. Все стыки листов жести были тщательно спаяны, очищены и покрыты цапонлаком для устранения влияния стыков на поток жидкости. При монтаже стыки между секциями заделывались подобным же образом.

Для измерения глубин в экспериментальном лотке были вмонтированы 5 пьезометров на расстоянии 1,5 м друг от друга. Первый пьезометр отстоял от начала лотка на 410 см, расстояние последнего от конца лотка — 205 см. Таким образом, длина измерительного участка при всех опытах равнялась 6 м. Все пьезометры были выведены на пьезометрический щит 19, в конце лотка. Каждый пьезометр имел стакан диаметром 35 мм, уровень в них фиксировался шпигмасштабами. Пьезометры были изгото-

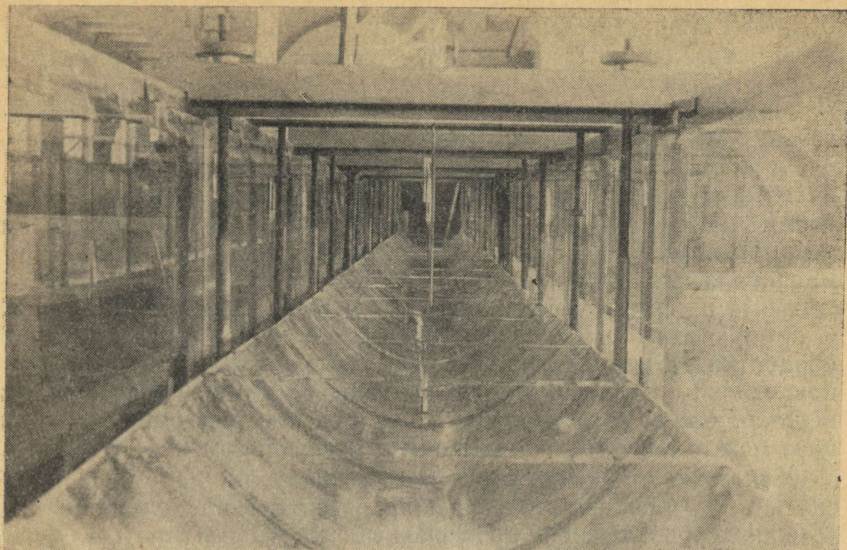


Рис. 2.

товлены в виде медных трубок давления с внешним диаметром 3 мм и длиной горизонтальной части 100 мм, ориентированных против направления течения (рис. 1). Концы трубок были запаяны и обточены до обтекаемой формы. На расстоянии 50 мм от конца трубки были просверлены по периметру 4 отверстия диаметром 1 мм. Трубки располагались на высоте 20 мм от дна. Предварительно были испытаны трубки с различными размерами: горизонтальной части, диаметра трубы и отверстий при различной высоте расположения над дном. Наиболее надежные показания дала вышеописанная конструкция трубок. Такой тип пьезометров являлся необходимым, т. к. при шероховатом русле показания обычных пьезометров (заделанных заподлицо с дном) являются ненадежными.

Для уменьшения возмущений при входе, в начале лотка были установлены направляющие стенки из жести длиной 50 см, а уменьшение волнения осуществлялось фанерным поплавком.

Как выше отмечалось, опыты были проведены с четырьмя видами шероховатости русла. Гладкое русло создавалось в случае треугольного и трапециoidalного профилей вмонтированием в лоток облицовки из оконного стекла толщиной 3 мм. Стекла имели следующие размеры: боковые стекла при треугольном русле 30×120 см, при трапециoidalном — 22×120 , донные стекла трапециoidalного русла — 10×75 см. Стекла были тщательно пригнаны друг к другу и посажены на слой густого масляного лака. Верхние края стекол прикреплялись к лотку зажи-

мами. Оставшиеся щели между стеклами были тщательно замазаны пластилином. Изготовление гладкого параболического русла описано выше.

Облицовка бетонного русла монтировалась из армированных бетонных плит толщиной 10 мм. Боковые плиты треугольного русла имели размеры 30×100 см, трапециoidalного русла — 22×100 см (от плит для треугольного сечения отрезалась полоса), донные плиты трапециoidalного русла — 10×75 см. Бетонные плиты изготавливались в промасленных фанерных формах с лицевой стороной (при облицовке канала) обращенной к форме из смеси портландцемента и песка в соотношении 1 : 3 и армировались проволоочной сеткой. Никакой дополнительной обработке плиты с лицевой стороны не подвергались. Плиты были прикреплены к лотку гвоздями, головки которых углублялись в бетон. Сверху эти неровности, так же как оставшиеся тонкие швы между плитами, замазывались пластилином.

Для создания искусственной шероховатости на стекла наносился песок определенной фракции. При помощи вибрационной установки промытый и просушенный песок был просеян через металлические штампованные сита диаметрами отверстий 3,0; 2,8; 1,2 и 1,0 мм. Таким образом были выделены две фракции средним диаметром зерен $d_{cp} = 2,9$ мм и $d_{cp} = 1,1$ мм. Для создания равномерной шероховатости (шероховатость I) была применена фракция $d_{cp} = 1,1$ мм, а для шероховатости неравномерного характера (шероховатость II) 85% (по покрываемой площади) песка $d_{cp} = 1,1$ мм и 15% $d_{cp} = 2,9$ мм. Для наклейки песка на стекла (или жель) применялся асфальтовый лак № 350, который для этого разбавлялся скипидаром до такой концентрации, чтобы его можно было нанести при помощи пульверизатора. Пульверизатором на стекла был нанесен тонкий слой лака, затем стекла обсыпались слоем песка определенной фракции. Через несколько минут лишний песок удалялся. После нанесения песка стекла просушивались в течение не менее 3—4 дней и затем пульверизатором наносился повторный слой более жидкого лака. О тонкости слоя лака свидетельствует тот факт, что на всю площадь лотка, равную примерно 7 м^2 , при двухкратном покрытии расходовалось около 600 см^3 разбавленного лака.

При создании шероховатости неравномерного характера первоначально на покрываемой поверхности равномерно распределялся соответственный объем крупной фракции, а затем уже просеивалась основная более мелкая фракция.

После нанесения второго слоя лака стекла просушивались в течение 3—4 дней и вмонтировались в лотки подобным же образом, как гладкие стекла. Стыки между стеклами промазывались лаком, а затем присыпались песком. После этого лоток оставался для дополнительной просушки еще на 2—3 дня. В итоге получалась однородная поверхность, на которой стыки практически не были заметны.

Измерение расходов и температуры воды. Измерение расходов производилось при помощи прямоугольного мерного водослива 6 (рис. 1), установленного в конце лотка. Напор H над гребнем водослива определялся по пьезометру 8, причем отсчеты производились при помощи шпигмасштаба с точностью до 0,1 мм. Расход определялся по тарировочной кривой. Тарировка водослива производилась объёмным способом. Ошибка при измерении расходов прямоугольным водосливом не превышает 1% [9]. Расходы меньше 2 л/сек измерялись объёмным способом.

Измерение температуры производилось лабораторным термометром с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$.

Измерение линейных размеров лотка. Монтаж опытных лотков различного сечения велся по точным шаблонам из оргстекла толщиной 10 мм. Те же шаблоны применялись для окончательной проверки и подгонки поперечных размеров опытных лотков перед каждым опытом. Ширина дна трапециoidalного лотка измерялась внутромером через каждые 25 см. Ширина по дну трапециoidalного русла с бетонной облицовкой равнялась 102 ± 1 мм, с стеклянными облицовками (гладкой или шероховатыми) — 99 ± 1 мм. Неточность в выполнении поперечных размеров опытных лотков находилась в пределах 1%. Пьезометры (трубки давления) монтировались на расстоянии 1500 мм друг от друга.

Установление уклонов дна опытных лотков. Уклон лотков устанавливался предварительно по оборотам 18 подъёмных винтов (шаг резьбы винта 2 мм) в 9 сечениях по длине лотка. При этом нижний конец лотка оставался неподвижным. Точная установка уклона производилась с помощью прецизионного нивелира НА-1 в 14 сечениях (в сечениях расположения подъёмных винтов и пьезометров). В качестве рейки служил специально приспособленный для этого шпигмасштаб. Отметки дна лотков устанавливались с точностью 0,1 мм.

Измерение глубин потока. Глубины потока были замерены в 5 точках по длине рабочего участка лотков длиной 6 метров. Во избежание случайных ошибок, замеры производились одновременно при помощи пьезометров и шпигмасштабов, установленных на бортах зеркального лотка. При этом, благодаря тому, что диаметры приемных отверстий пьезометров (трубок давления) были всего 1 мм, в то время как внутренний диаметр их стеклянных стаканов был 35 мм, колебания уровней в пьезометрах даже при скоростях, превышающих 2,5 м/сек, совершенно не наблюдалось. Отсчеты по пьезометрам брались при помощи шпигмасштабов с точностью 0,1 мм.

Измерение скоростей. Наряду с измерением сопротивлений при части опытов производилось и измерение скоростей

в сечении, находящемся на расстоянии около 7 метров от входа в лоток. Измерения скоростей выполнялись трубкой Прандтля, оборудованной для повышения точности отсчетов ползунком с диоптрами, волоском и зеркалом.

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ

Исходя из желания получить возможно более полную картину закономерностей сопротивления в открытых руслах, опыты были проведены в довольно широком диапазоне. Как выше уже отмечено, треугольное и трапециoidalное русла испытывались с четырьмя различными видами шероховатости, а параболическое русло с гладкой и равнозернистой песчаной поверхностями. Таким образом было проведено 10 групп опытов. Каждая группа состояла из 7 серий при уклонах опытных лотков соответственно 0,0005; 0,001; 0,002; 0,004; 0,008; 0,016 и 0,032. При первых 3—4 уклонах имело место спокойное состояние потока, при остальных поток находился в бурном состоянии. При том или ином уклоне через лоток пропусклось 5—7 (обычно 6) различных расходов. Общий диапазон расходов от 0,59 л/сек до 81,7 л/сек. Числа Рейнольдса изменялись в пределах $Re = \frac{4RV}{\nu} = 10\,000 \div 550\,000$,

а числа Фруда $Fr = \frac{\alpha Q^2 B}{g \cdot \omega^3} = 0,07 \div 11,70$. Гидравлический радиус изменялся при каждой серии в пределах от 2,5 до 6,5 см. Всего было проведено 428 опытов.

При каждом опыте измерялись расход, температура и глубина потока. Определение глубины производилось по разному в зависимости от состояния потока. При бурном состоянии в лотках образовывались кривые спада типа b_{II} , глубины которых были зарегистрированы пьезометрами в 5 сечениях потока. В случае спокойного течения определялась нормальная глубина равномерного потока. Для этого при помощи щита, расположенного в конце опытного лотка (рис. 1—20), создавался ряд кривых подпора и спада. Как и в исследованиях А. П. Зегжда [3, 4] за глубину, отвечающую равномерному движению, принималась глубина, соответствующая точке перехода свободной поверхности из состояния спада в состояние подпора. Эта глубина определялась графически. Для учета уменьшения живого сечения потока за счет слоя песка в русле лотка средняя толщина этого слоя определялась следующим образом. Стекла, покрытые определенной шероховатостью, погружались в сосуд с водой и определялся общий их объем. Предварительно определялся объем чистых стекол. Средняя толщина слоя шероховатости определялась делением объема песка на площадь стекол. При равнозернистой шероховатости средняя толщина слоя равнялась 0,5 мм, при неравно-

мерной — 0,6 мм. Это уменьшение размеров живого сечения потока учитывалось при подсчетах коэффициентов сопротивления.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ λ . ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ.

При спокойном потоке коэффициенты сопротивления подсчитывались по формуле

$$\lambda = \frac{8g \cdot R \cdot i_0 \cdot \omega^2}{Q^2}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент сопротивления трения по длине;

R — гидравлический радиус;

i_0 — уклон дна лотка;

Q — расход;

g — ускорение силы тяжести;

ω — площадь живого сечения потока.

R и ω соответствовали нормальной глубине h_0 равномерного потока.

При бурном режиме в лотках имело место неравномерное течение — образовывались кривые спада типа b_{II} . Исходя из общепринятого предположения, подтвержденного опытами Бетесса [11], что сопротивления при равномерном и неравномерном движениях одинаковы, коэффициенты сопротивления для бурного потока были подсчитаны по формуле

$$\lambda_n = \frac{8g \cdot R_{cpn} \cdot I_n \cdot \omega_{cpn}^2}{Q^2} \quad (2)$$

отдельно для каждого участка между двумя пьезометрами.

Здесь $R_{cpn} = \frac{R_{1n} + R_{2n}}{2}$ — средний гидравлический радиус потока участка n ($n = 1, 2, 3, 4$), где

R_{1n} — гидравлический радиус начального сечения участка n ;

R_{2n} — гидравлический радиус конечного сечения участка n

и

$$\omega_{cpn} = \frac{\omega_{1n} + \omega_{2n}}{2}.$$

Гидравлический уклон потока на участке определялся по формуле

$$I_n = \frac{1}{l} \left[\left(z_{1n} + h_{1n} + \frac{\alpha V_{1n}^2}{2g} \right) - \left(z_{2n} + h_{2n} + \frac{\alpha V_{2n}^2}{2g} \right) \right], \quad (3)$$

где Z_{1n} и Z_{2n} — отметки дна в концах участка n , h_{1n} и V_{1n} — глубина и средняя скорость потока в начальном сечении участка n ;

h_{2n} и V_{2n} — то же в конечном сечении; $l = 150$ см — длина участка.

Коэффициенты кинетической энергии α подсчитывались на основании 37 опытов по замеру распределения скоростей. Оказалось, что между значениями α и соответствующими коэффициентами сопротивления λ существует достаточно тесная связь. Методом наименьших квадратов найдена формула:

$$\alpha = 1 + 3,05 \lambda. \quad (4)$$

Формула (4) отличается от подобной формулы Базена [12]:

$$\alpha = 1 + \frac{210}{C^2} = 1 + 2,68 \lambda$$

лишь численным коэффициентом.

При вычислении λ в первом приближении α принимались равным 1,1, затем подсчитывались более точные значения α по формуле (4) и вводя эти α в уравнение (3) определялись окончательные значения λ . За коэффициент сопротивления λ_{cp} всего потока принималось арифметическое среднее участков: $\lambda_{cp} = \frac{1}{4} (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)$.

Для каждого значения λ или λ_{cp} определялось соответствующее ему значение числа Рейнольдса по выражениям

$$\text{Re} = \frac{4RQ}{v\omega} \quad (5)$$

для равномерного и

$$\text{Re}_{cp} = \frac{4R_{cp} \cdot Q}{v\omega_{cp}} \quad (6)$$

для неравномерного потока, где Re — число Рейнольдса; v — кинематический коэффициент вязкости; R_{cp} и ω_{cp} — средний гидравлический радиус и средняя площадь живого сечения, отвечаю-

щие средней глубине h_{cp} неравномерного потока ($h_{cp} = \frac{1}{5} \sum_1^5 h_i$,

где h_i — глубина потока в сечении i).

Значения λ (или λ_{cp}) наносились на графики $\lambda = f(R)$ (или $\lambda_{cp} = f(R_{cp})$) и по этим графикам определялись величины λ (или λ_{cp}) для 5 значений гидравлического радиуса R (или R_{cp}): 2,5; 3,5; 4,5; 5,5 и 6,5 см. Таким же образом составлялись графики $\text{Re} = f(R)$ или $\text{Re}_{cp} = f(R_{cp})$ и по этим графикам для тех же значений гидравлического радиуса определялись соответственные числа Рейнольдса. Полученные таким образом коэффициенты сопротивления и соответствующие им числа Рейнольдса наносились на графики в координатах $\log(100\lambda)$ и $\log \text{Re}$ (рис. 3 ÷ 6).

Прежде чем приступить к детальному рассмотрению результатов проведенных опытов, уместно дать оценку точности найденных вышеуказанным путем коэффициентов сопротивления.

Из уравнения (1) получим выражение для относительной ошибки λ :

$$\delta\lambda = \delta_R + \delta_{i_0} + 2\delta\omega + 2\delta Q \quad (7)$$

Относительные ошибки δ_R и $\delta\omega$ зависят от погрешностей при определении глубины h , ширины потока по дну b и коэффициента заложения откосов m . Учитывая, что на всем протяжении проведения группы опытов величины b и m остаются постоянными, относительные ошибки δ_R и $\delta\omega$ будут зависеть только от погрешности замера глубины δ_h .

Для параболического профиля построенного по формуле

$$y^2 = 2px, \text{ где } p = 18 \text{ см имеем}$$

$$\omega = 8h^{3/2} \text{ и } R = F(\tau) \cdot h \text{ [13].}$$

$$\text{Отсюда } \delta\omega = 3/2 \delta_h \text{ и } \delta_R \approx \delta_h.$$

При треугольном сечении получим соответственно

$$\delta\omega = 2\delta_h \text{ и } \delta_R = \delta_h.$$

При проведении опытов глубины в лотках при одинаковом диапазоне изменения гидравлического радиуса (2,5 ÷ 6,5 см) находились в следующих пределах: при треугольном сечении примерно от 6,5 до 20 см, при трапециoidalном — 3,5 ÷ 14,5 см и при параболическом — 3,7 ÷ 12 см. Исходя из того, что площадь живого сечения и гидравлические радиусы при одной и той же глубине сравнительно близки для параболического и трапециoidalного русел, мы допускаем, что точность определения коэффициентов сопротивления в обоих случаях примерно одинакова.

Таким образом, можно переписать (7) для треугольного сечения:

$$\delta\lambda = 5\delta_h + \delta_{i_0} + 2\delta Q, \quad (8)$$

а для параболического сечения:

$$\delta\lambda = 4\delta_h + \delta_{i_0} + 2\delta Q. \quad (9)$$

Относительная ошибка уклона δ_{i_0} зависит от абсолютной величины i_0 . Как было указано, установка уклона производилась с точностью отметок дна до 0,1 мм. Длина рабочего участка лотков равнялась 6000 мм. Максимальная относительная ошибка уклона получается в случае, когда в концевых сечениях рабочего участка лотка имели место погрешности отметок дна по 0,1 мм с разными знаками. Значения максимальных относительных ошибок для всех уклонов приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1.

Уклон i_0	0,0005	0,001	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032
δ_{i_0} %	6,7	3,3	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1

Как видно из таблицы, δ_{i_0} становится ничтожным при уклонах более 0,004.

Глубины потока были определены, как выше указано, с точностью до 0,1 мм, с такой же точностью определялись нулевые отметки пьезометров. Если принимать эти ошибки с разными знаками, то абсолютная ошибка при определении глубин при помощи пьезометров равна 0,2 мм. При минимальной глубине в лотках 3,5 см (параболическое и трапециoidalное русло) относительная ошибка измеренных глубин $\delta_h \approx 0,6\%$. Минимальной глубине в треугольном русле 6,5 см отвечает максимальная относительная ошибка $\delta_h \approx 0,3\%$.

Для оценки максимальной относительной ошибки при определении коэффициентов сопротивления δ_λ приведем некоторые примеры. Ошибка будет максимальной при минимальной глубине в параболическом русле и минимальном уклоне 0,0005. Тогда

$$\delta_\lambda = 4 \cdot 0,6 + 6,7 + 2 \cdot 1,0 \approx 11\%.$$

При глубине $h = 10$ см в треугольном русле и уклоне 0,004 имеем

$$\delta_h = 0,2\%, \delta_{i_0} = 0,8\%, \delta_Q = 1\% \text{ и } \delta_\lambda \approx 4\%.$$

Рассматривая диапазоны изменения глубины и уклона, становится ясным, что основная масса опытных результатов имеет максимальную относительную ошибку менее 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ИХ С ОПЫТАМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

1. Гладкая поверхность

На рис. 3 в координатах $\log Re$ и $\log (100\lambda)$ нанесены для пяти значений гидравлического радиуса R точки, полученные в опытах в гладких лотках параболического, трапециoidalного и треугольного сечений. На тот же график нанесена кривая, отвечающая формуле Прандтля — Никурадзе для гладких круглых труб.

Экспериментальные точки для параболического лотка в общем очень хорошо совпадают с кривой для гладких круглых труб. Отклонения находятся в пределах точности проведения опытов. При треугольном же сечении такое совпадение при определенной относительной шероховатости имеет место только для меньших значений числа Рейнольдса, при больших Re опытные точки отклоняются от этой кривой. Такое явление наблюдается и при трапециoidalном сечении, но здесь все опытные точки располагаются несколько выше кривой для гладких труб. Отклонение опытных точек для треугольного и трапециoidalного сечений при больших Re объясняется, по-видимому, тем, что несмотря на тщательную заделку стыков между стеклами, эти лотки являлись

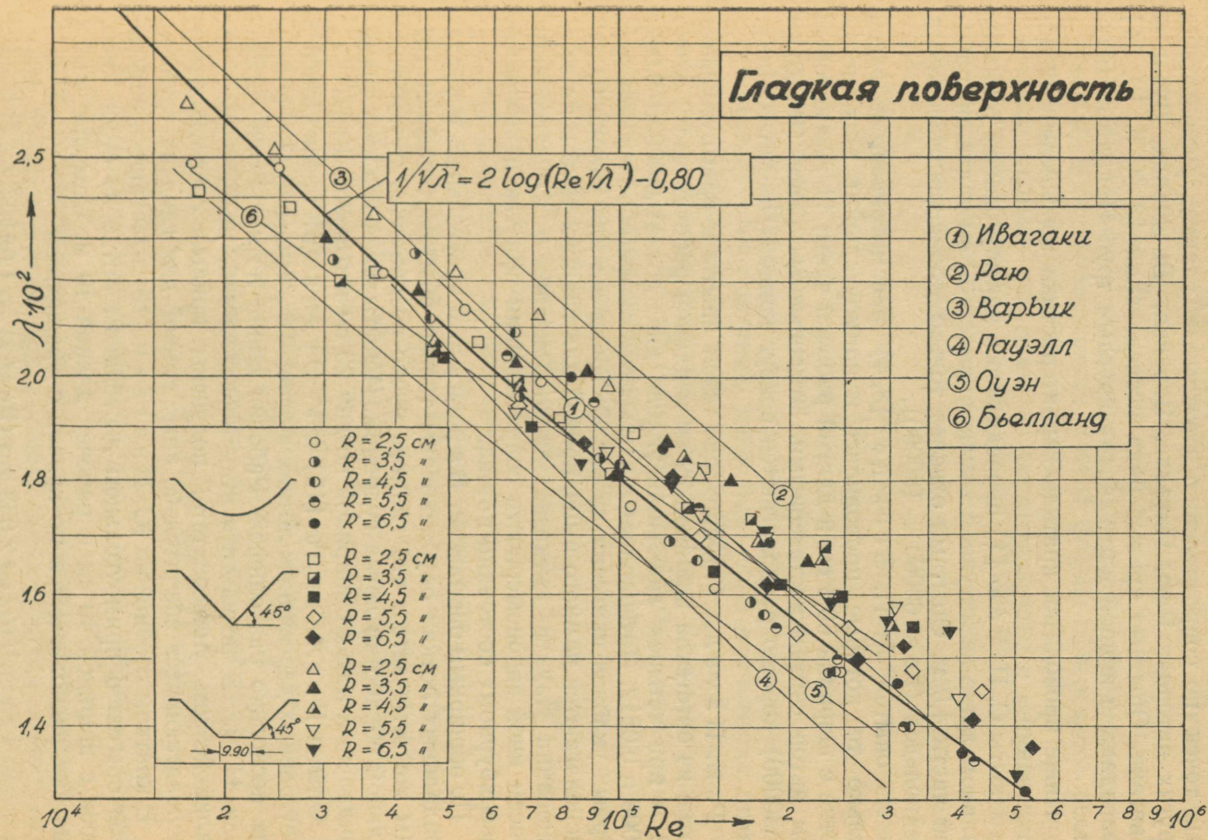


Рис. 3.

гидравлически гладкими только в ограниченных пределах Re , дальше же работали в переходной зоне сопротивления.

На рис. 3 также нанесены интерполяционные кривые опытных точек по сопротивлению в открытых гладких руслах ряда других авторов: Раю, Пауэлла, Варвика, Бьелланда, Оуэна и Ивагаки. Опытные кривые ряда исследований [3, 4, 5, 10, 14] совпадают с кривой для гладких круглых труб Прандтля-Никурадзе.

Ниже проводится краткая характеристика перечисленных исследований.

Опыты С. П. Раю [1] проводились в прямоугольном горизонтальном лотке из лагунной жести шириной 30 см и длиной рабочей части 4,5 м. Опытами охвачен только узкий диапазон числа Рейнольдса ($Re \approx 60000 \div 180000$).

Из опытов А. П. Зегжда [3, 4] рассматриваются здесь только те, которые проводились в прямоугольном стеклянном лотке с шириной 60,5 см и длиной рабочей части 11 м и которые сам автор считал достоверными. Эти опытные точки (Re до ≈ 30000) хорошо располагаются вокруг кривой Прандтля-Никурадзе.

Р. В. Пауэлл [7] проводил свои опыты в прямоугольном лотке из оргстекла шириной 20 см и длиной рабочей части около 12 м при четырех значениях уклона дна лотка: 0,0005; 0,002; 0,008 и 0,0312. Интерполяционная кривая опытных точек для трех первых уклонов нанесена на рис. 3. Точки же для уклона 0,0312 располагаются намного выше кривой для гладких труб и на этом основании Пауэлл высказал предположение о существовании совсем иной закономерности сопротивления при так называемом «сверхбурном» состоянии потока.

По обширным опытам Ф. Варвика в треугольных и трапециoidalных лотках опубликованы только опытные графики [8]. Там же отмечается, что гладкое русло создавалось путем тщательной обработки лотка гудроном. Испытывался гладкий трапециoidalный лоток с шириной по дну 20 см и откосом 1 : 1.

Опыты Бьелланда [15] и У. Оуэна [6] проводились в треугольных деревянных лотках с углом 90° , строганных и покрытых несколько раз олифой. Рабочая длина лотка Оуэна составляла 11 м. В результате этих исследований, проведенных при Иллинойском университете, получены кривые сопротивления, располагающиеся значительно ниже кривой для гладких труб.

В кратком сообщении Ю. Ивагаки [16] излагаются результаты опытов в прямоугольном деревянном лотке из строганных досок с шириной 40 см и рабочей длиной 10 м. Опытные точки Ивагаки располагаются по кривой с уравнением

$$1/\sqrt{\lambda} \approx 2,033 \log (Re \sqrt{\lambda}) - 1,081.$$

Э. Марки [10] исследовал движение воды в стеклянном

прямоугольном лотке с шириной 11,75 см и длиной рабочей части 5,5 м. Опытами охвачен диапазон чисел Рейнольдса от 38 000 до 235 000, а значение числа Фруда возросло до 23 (при максимальном угле лотка 0,0611 и глубине потока 2 см). Опытные точки хорошо укладываются на кривую для гладких труб.

В работе Л. Г. Страуба, Э. Зильбермана и Х. С. Нельсона [14] дается обзор ряда лабораторных исследований в открытых лотках разной формы поперечного сечения при малых значениях числа Рейнольдса (до 40 000). Приводятся опытные кривые для гладкого прямоугольного и ряда треугольных лотков с углами 30, 60, 90, 120 и 150 градусов. Опытные точки для прямоугольного русла хорошо укладываются на кривую для гладких труб, для треугольных же — немного ниже последней.

На основании опытов в гладком треугольном лотке длиной около 20 м Т. Роджерс [5] пришел к выводу, что формула для гладких труб Прандтля-Никурадзе применима также для открытых русел любой формы поперечного сечения.

Этим и охвачены все известные автору систематические исследования по сопротивлению движению воды в открытых гладких руслах. Некоторые серии Базена [12] — серия 2 (прямоугольное русло с цементной облицовкой), серия 24 (полукруг из цемента) и серии 28 и 29 (тщательно строганный деревянный прямоугольный лоток с шириной 10 см) — можно также относить к гладким руслам, но сравнивать их не представляется возможным, т. к. они проведены в неподобных руслах. По той же причине не рассматриваются опыты Дж. Аллена [2] в гладком прямоугольном лотке.

На основании перечисленных исследований и исследований автора могут быть сделаны следующие выводы.

1. Закономерной зависимости сопротивления движению воды в открытых гладких руслах от формы поперечного сечения не обнаруживается. Все опытные кривые, за исключением нескольких американских опытов (Оуэн, Бьелланд, Пауэлл) и опытов Раю, располагаются близко к кривой для гладких круглых труб. Хотя опытные точки для трапециoidalных лотков (Варвика, автора) располагаются несколько выше этой кривой, можно с достаточной точностью применять формулу для гладких труб

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,0 \log (\operatorname{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,80$$

для расчета открытых гладких русел любой формы поперечного сечения.

2. Существование совсем иной закономерности сопротивления для бурного потока при высоких числах Фруда, обнаруженной опытами Пауэлла, не подтверждается опытами других исследователей, проведенными в бурном потоке с большими значениями числа Фруда (в опытах Э. Марки до $\operatorname{Fr} = 23$, в наших опытах

до $Fg = 12$). Этот вывод Пауэлла основан на опытах только при одном уклоне лотка и не исключена возможность существования каких-то посторонних факторов, повышающих сопротивление движению воды. Представляется возможным, что «волновой» режим вызывался определенной волнистостью стенок опытного лотка, отмеченной самим Пауэллом.

2. Бетонные поверхности

Результаты опытов в треугольном и трапециoidalном бетонных лотках отражены на рис. 4. На график нанесены также кривая сопротивления по формуле Прандтля-Никурадзе для гладких круглых труб и кривые для труб технической шероховатости по формуле Кольбрука [17] для некоторых значений относительной шероховатости $\frac{\varepsilon}{4R} = \text{const}$.

Для треугольного сечения опытные точки при меньших Re хорошо укладываются на кривую для гладких труб, а потом отклоняются от нее и ложатся в общем вдоль кривых Кольбрука. Интерполяционные кривые точек для трапециoidalного русла имеют такой же характер, но располагаются несколько выше точек полученных для лотка треугольного сечения и не доходят до кривой Прандтля-Никурадзе. Это обстоятельство указывает на кажущуюся большую шероховатость трапециoidalного сечения, что можно объяснить только влиянием формы поперечного сечения. Это влияние уменьшается с увеличением глубины (гидравлического радиуса) потока. При больших наполнениях разница между коэффициентом сопротивления трапециoidalного и треугольного сечений не превышает 5%.

Аналогичные выводы получены опытами Э. Марки [10] в трапециoidalном и треугольном лотках из заглаженного бетона. Треугольное русло с откосом 1 : 0,550 и трапециoidalное с шириной по дну $b = 8,35$ см и откосом 1 : 0,558 создавались вмонтированием бетонных блоков в металлический лоток длиной 11,70 м и шириной 30 см. Рабочая длина лотка составляла 9 метров. Опыты в трапециoidalном лотке проводились при трех значениях глубины потока: 3,5; 6,0 и 10,0 см, а в треугольном лотке при глубине 13,2 см. Уклоны лотка изменялись в пределах от 0,000345 до 0,0320. Интерполяционные кривые опытных точек Э. Марки, нанесенные на рис. 4, имеют также нисходящий характер, типичный для труб с технической шероховатостью. Обнаруживается разница между сопротивлением трапециoidalного и треугольного русел — при одних и тех же значениях $\varepsilon/4R$ и R значения λ увеличиваются примерно на 15% при переходе от треугольника к трапеции.

Вопросу о сопротивлении движению воды в натуральных бетонных каналах посвящено очень много более ранних работ, целью

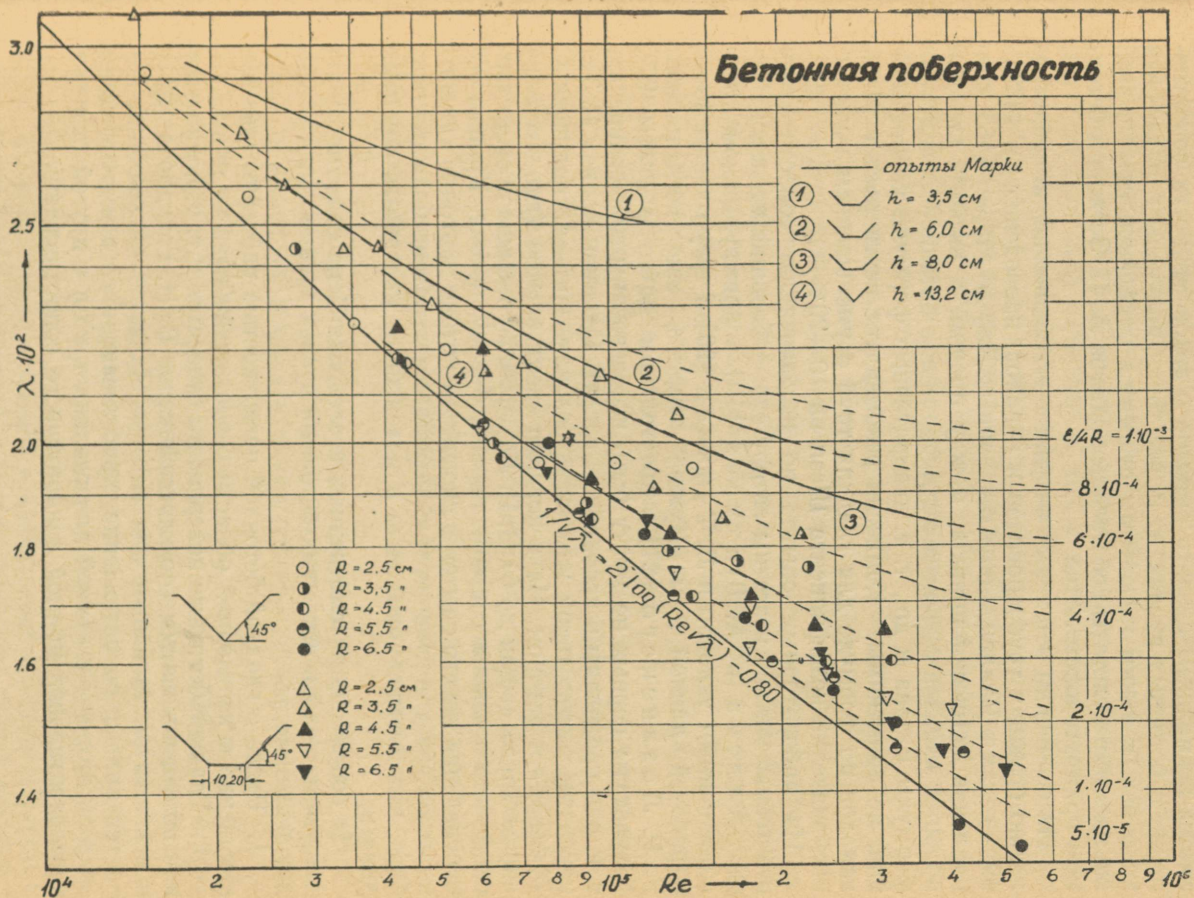


Рис. 4.

которых являлось определение коэффициента шероховатости русла n . Большая часть результатов этих работ собрана в книге А. П. Зегжда [4]. Однако на основании этих данных не представляется возможным сделать выводов о закономерности сопротивления в бетонных руслах, т. к. все точки получены в различных условиях. К таким же опытам относятся опубликованные в этой же работе результаты собственных опытов А. П. Зегжда в бетонном прямоугольном лотке.

На основании обширных натурных исследований по сопротивлению больших трубопроводов и каналов, проведенных в 1932—1934 годах в Италии и опубликованных Дж. де Марки [18], специальная комиссия пришла, между прочим, к выводу, что для больших каналов с тщательно заглаженной бетонной облицовкой формулы Базена и др., т. е. квадратичные формулы сопротивления, не применимы. Комиссия рекомендует вести расчет таких каналов по формуле для гладких труб с уменьшением полученных значений коэффициента Шези на 10—20%.

Из лабораторных опытов по исследованию сопротивления в бетонных лотках известны автору еще небольшие исследования Дж. Аллена и А. Шахуана [19] в прямоугольном лотке с постоянным уклоном и Л. Тепакса [20] в треугольном лотке с рабочей длиной 2 м. Нужно отметить еще исследования В. Р. Лозанского [21] в треугольном лотке с углом 90°. Результаты первых не могут быть использованы для сравнения, т. к. они проделаны в неподобных руслах. Опытная кривая Л. Тепакса же имеет такой же характер, как кривые, полученные Э. Марки и автором. На основании своих опытов (где значения числа Фруда дошли до 6) В. Р. Лозанский утверждает существование иного закона сопротивления в бурном потоке. Кривые сопротивления же его опытов в спокойном потоке проходят намного ниже кривой для гладких труб и точки имеют очень большой разброс, что вызывает сомнение в надежности указанных опытных данных.

На основании рассмотренных исследований по сопротивлению движению воды в открытых бетонных руслах можно сделать следующие выводы.

1. Русла с гладкой бетонной поверхностью работают преимущественно в переходной области сопротивления.

2. Гладкие бетонные поверхности относятся к т. н. волнистым или полущероховатым (по классификации В. Н. Гончарова [22]) поверхностям, типичным для которых является нисходящий характер кривых сопротивления, приближающихся асимптотически с одной стороны к кривой для гладких труб и с другой стороны к горизонтальной прямой квадратичного сопротивления.

3. Песчаные шероховатости

На рис. 5 и 6 приведены опытные кривые сопротивления $\log(100\lambda) = f(\log Re)$ при $R = \text{const.}$ соответственно для равнозернистой песчаной шероховатости (шероховатость I) и для неравнозернистой песчаной шероховатости (шероховатость II).

Кривые сопротивления для искусственных песчаных шероховатостей (как для однородной, так и для неоднородной) имеют характер известных кривых сопротивления, полученных опытами Никурадзе [27] с однородной песчаной шероховатостью в круглых трубах. При этом эти кривые принимают начало не от кривой гладких круглых труб, а от кривой почти параллельной ей, но находящейся от последней на расстоянии, возрастающем с увеличением шероховатости русла.

При нанесении на графики опытных точек, относящихся к бурному состоянию потока обнаруживается интересный факт: кривые сопротивления принимают нисходящий характер и имеют явное стремление соединиться в одну кривую, параллельную кривой для гладких круглых труб. Как видно из фиг. 5 и 6, расстояние этих кривых от кривой для гладких труб увеличивается с увеличением шероховатости русла и зависит также от формы поперечного сечения. На рисунки нанесены для сравнения некоторые изолинии числа Фруда для значений $Fr = 1$ и $Fr = 2$.

Как для бетонной поверхности, так и для песчаных шероховатостей обнаруживается разница между коэффициентами сопротивления разных форм поперечного сечения при одинаковом R , причем параболическая форма дает наименьшие, трапециoidalная — наибольшие значения λ . Разница в коэффициентах сопротивления в данном случае уменьшается с увеличением глубины потока. При переходе от треугольной к трапециoidalной форме поперечного сечения при постоянном R значения λ увеличиваются для шероховатости I на 3–7%, для шероховатости II — на 5–15%.

Ниже приводится краткое описание известных автору других экспериментальных исследований по сопротивлению движению воды в открытых руслах с искусственной зернистой шероховатостью.

Одним из первых исследований, сделанных после опубликования результатов экспериментов И. Никурадзе [27] в трубопроводах с искусственной шероховатостью, является общеизвестная работа А. П. Зегжда [3, 4]. Целью исследований А. П. Зегжда являлось выяснение применимости для открытых русел выводов Никурадзе, подтвержденных полуэмпирической теорией турбулентности Прандтля — Кармана. В результате исследований А. П. Зегжда пришел к выводу о качественном и количественном совпадении закономерностей сопротивления для труб и открытых русел с равнозернистой шероховатостью. Результаты более поздних исследований несколько отличаются от выводов Зегжда.

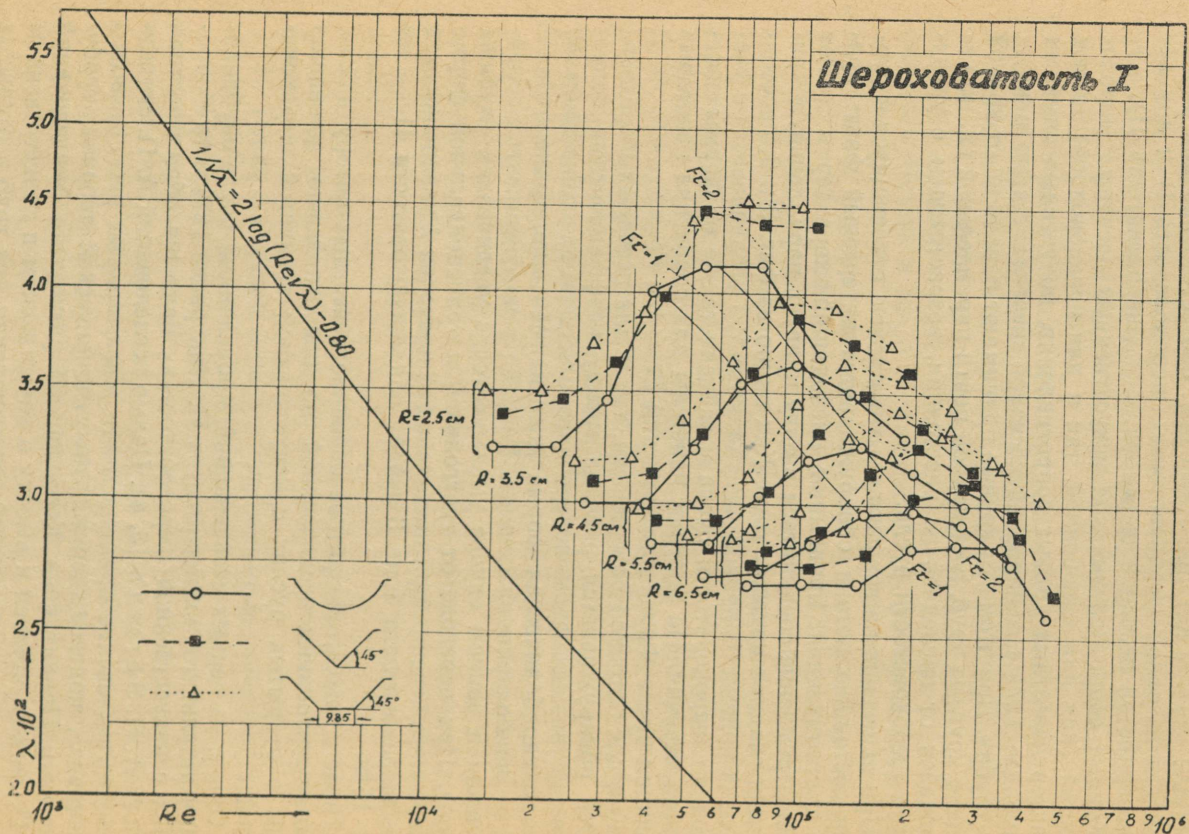


Рис. 5.

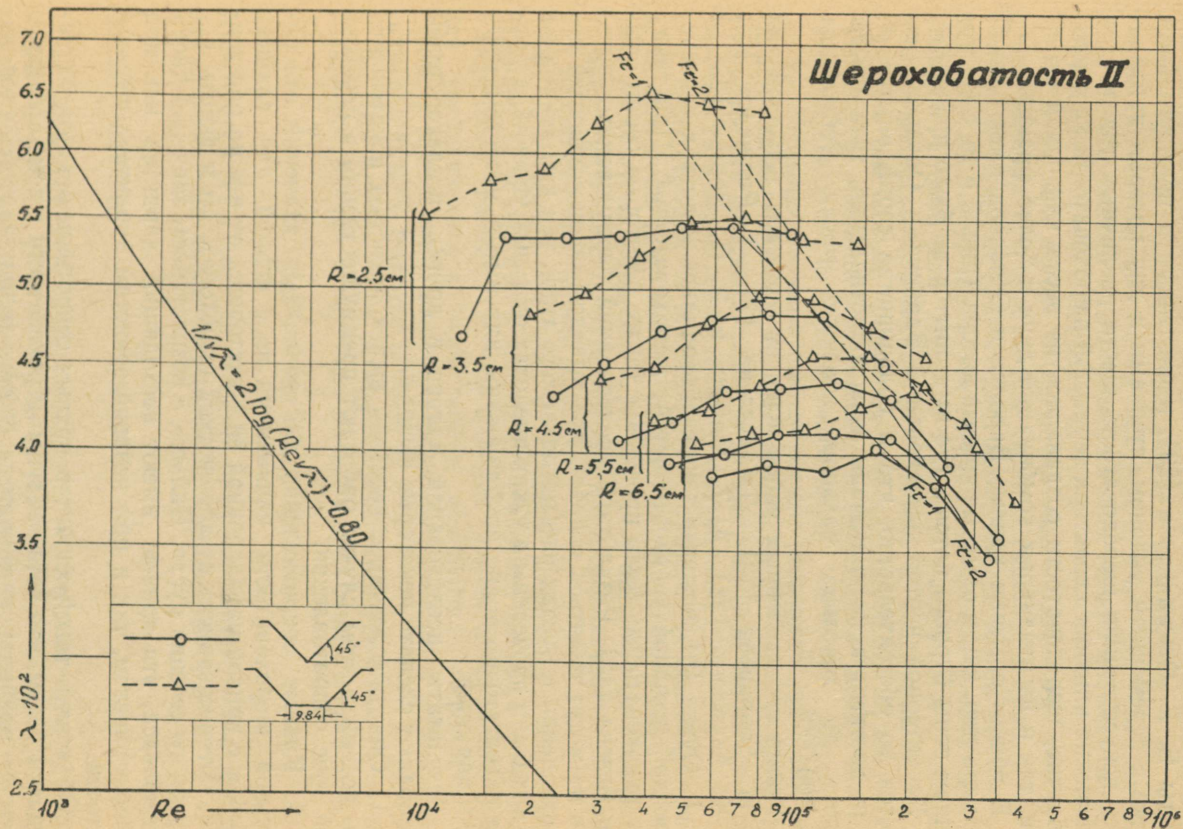


Рис. 6.

Ф. Варвиком [8] также проведены обширные опыты по сопротивлению движению воды в трапецидальном и треугольном лотках покрытых равнозернистой песчаной шероховатостью трех различных крупностей. Большой интерес представляют опыты Е. Е. Овчарова [23], проведенные в прямоугольном лотке с переменным уклоном, стенками и дну которых придавалась искусственная шероховатость шести различных типов. Для выяснения влияния характера зернистой шероховатости на сопротивление, шероховатости создавались из песка как одной фракции, так и из различных комбинаций двух и более фракций.

В общем опытные кривые Варвика и Овчарова имеют такой же характер, как и опытные кривые автора (рис. 5 и 6) с исключением зоны бурного потока, где ими опытов не было проведено.

Характерной чертой исследований Варвика и Овчарова является то обстоятельство, что в большинстве серий опытов не была достигнута квадратичная зона сопротивления, хотя опыты велись до довольно больших значений числа Рейнольдса ($\approx 300\,000$).

Кроме перечисленных работ следует отметить исследования В. И. Гончарова [22], Дж. Аллена [2], Т. Роджерса [5], А. К. Ахундова [24], А. Т. Иппена и Р. П. Верма [25] и М. У. Оуэна [6], которые также проводились в лотках с искусственной песчаной (равнозернистой) шероховатостью. При таких же шероховатостях были проведены также некоторые серии опытов Базена [12]. Результаты исследований перечисленных авторов не могут являться основой для выводов закономерностей сопротивления в руслах рассматриваемого типа, так как некоторые из них были проведены в узких пределах опытных условий, а другие недостаточно полно опубликованы или имеют несистематический характер.

Результаты исследований автора и других исследователей позволяют сделать некоторые выводы.

1. Опыты в лотках с песчаной шероховатостью показывают, что потоки в этом случае работают преимущественно в переходной зоне сопротивления.

2. Кривые сопротивления для различных значений относительной шероховатости начинаются не с кривой для гладких труб, а с кривой параллельной ей и отстоящей от нее на расстоянии, которое зависит от абсолютной шероховатости и формы поперечного сечения русла. Дальше, с возрастанием значений числа Рейнольдса, эти кривые имеют восходящий характер как при равнозернистом, так и при неравнозернистом характере шероховатости.

Объяснять такой характер кривых сопротивления можно, по-видимому, тем, что хотя выступы шероховатости в зоне «гладкого трения» покрыты ламинарным слоем, толщина этого слоя является различным над гребнями элементов шероховатости и впадинами между ними. Это вызывает увеличение скоростных гра-

диентов, а вместе с ними касательных напряжений и сопротивления над гребнями элементов шероховатости. С возрастанием числа Re и уменьшением тем самым толщины ламинарного слоя элементы шероховатости почти одновременно выступают из этого слоя, что сопровождается увеличением коэффициента сопротивления. Более пологий подъем опытных кривых при неравнозернистой шероховатости II в переходной зоне можно объяснить экраняющим действием больших зерен.

3. В бурном потоке обнаружено уменьшение коэффициентов сопротивления с возрастанием числа Рейнольдса (рис. 5 и 6). При этом опытные кривые для различных значений относительной шероховатости стремятся соединиться в одну кривую параллельную кривой для гладких труб. Механизм этого явления можно представить следующим образом. С возрастанием числа Фруда и тем самым придонной скорости поток как будто «перепрыгивает» впадины заполненные завихрениями между элементами шероховатости. При этом создается состояние потока, подобное течению по «полупероховатым» поверхностям [22] или «квазигладкому потоку» по классификации Г. Морриса [26]. При рассмотрении опытных кривых обращает на себя внимание ограниченность зоны квадратичного сопротивления.

Между прочим, в работе Л. Г. Страуба, Э. Зильбермана и Х. С. Нельсона [14] имеется ссылка на получение такого же характера опытных кривых $\lambda = f(Re)$, как у автора, при спокойном потоке в треугольном лотке с ребристой шероховатостью, а также для сопротивления трения корабля.

4. При опытах в руслах с песчаной шероховатостью обнаруживается зависимость коэффициента сопротивления от формы поперечного сечения. Причем влияние формы поперечного сечения увеличивается с возрастанием абсолютной шероховатости русла, а при данной шероховатости уменьшается с увеличением гидравлического радиуса потока.

5. Для определения коэффициента сопротивления в зонах «гладкого трения» и «бурного потока» применима формула типа

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A \log (Re \sqrt{\lambda}) + B.$$

Имеющиеся же в настоящее время опытные данные недостаточны для определения численных значений параметров A и B .

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Сопротивление движению воды в гидравлически гладких открытых руслах разной формы поперечного сечения достаточно хорошо выражается формулой Прандтля-Никурадзе для гладких труб.

2. Кривые сопротивления при технической (гладкий бетон)

шероховатости имеют нисходящий характер подобно аналогичным кривым для труб с технической шероховатостью [10, 12]. Расчет таких русел следует вести по формулам типа Шевелева [28] или Кольбрука.

3. При искусственной песчаной шероховатости кривые зависимости λ от Re при $R = \text{const.}$ имеют восходящий характер, как это было получено Никурадзе для круглых труб с равнoзернистой шероховатостью. Это имеет место как при равнoзернистых, так и при неравнoзернистых песчаных шероховатостях. Опытные кривые для различных значений относительной шероховатости соединяются не с кривой сопротивления гладких труб, а с кривой почти параллельной ей и отстоящей от нее на расстоянии, которое зависит от шероховатости и от формы поперечного сечения русла.

4. Проведенные опыты показывают, что форма поперечного сечения русла в какой-то мере сказывается на сопротивлении. При гидравлически гладких руслах это влияние мало и им можно пренебречь, с увеличением же шероховатости русел влияние формы поперечного сечения возрастает. При одной и той же шероховатости разница в коэффициентах сопротивления для разных форм поперечного сечения уменьшается с увеличением глубины (гидравлического радиуса) потока. При одинаковом гидравлическом радиусе наименьшие коэффициенты сопротивления из исследованных автором русел имеет русло параболического сечения, наибольший — трапециoidalного сечения. Влияние формы поперечного сечения можно объяснить действием вторичных потоков [8 и др.].

5. Опытами в руслах песчаной шероховатости обнаружено уменьшение коэффициентов сопротивления при бурном состоянии потока. При этом опытные точки для разных значений относительной шероховатости стремятся к соединению в одну кривую, параллельную кривой для гладких круглых труб. Расстояние этих кривых от последней зависит от величины абсолютной шероховатости русла, а при данной шероховатости и от формы поперечного сечения. Существование же другой закономерности сопротивления в бурном потоке для гладких и бетонных русел, которое утверждает Р. Пауэллом и В. Р. Лозанским, опытами других исследователей не подтверждается.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. P. Raju. Versuche über den Strömungswiderstand gekrümmter offener Kanäle. Mitteilungen des Hydr. Inst. der Techn. Hochschule, München, Vol. 6, 1933.
2. J. Allen. Streamline and turbulent flow in open channels. Phil. Mag. and Journal of Science, Vol. 17, No. 116, 1934.
3. А. П. Зегжда. Теория подобия и методика расчёта гидротехнических моделей. Госстройиздат, 1938.
4. А. П. Зегжда. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Госиздат. лит. по строит. и архит., 1957.
5. Th. De F. Rogers. Friction in hydraulic models. Civil Engineering Vol. 9, No. 6, 1939.
6. W. M. Owen. Correlation between pipe flow and uniform flow in a triangular open channel. Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 34, No. 2, 1953.
7. R. W. Powell. Flow in a channel of definite roughness. Proceedings ASCE, No. 10, 1944.
8. O. Kirschmer. Pertes de charge dans les conduits forcés et les canaux découverts. Revue Générale de l'Hydraulique, No. 51, 1949.
9. Н. Н. Павловский. Гидравлический справочник. ОНТИ, 1937.
10. E. Marchi. Il movimento uniforme nelle correnti a pelo libero. La Ricerca Scientifica, No. 8, 1956.
11. F. Bettess. An investigation of non-uniform flow in channels. Civil Eng. and Public Works Review, Vol. 52, No. 609, 610, 1957.
12. H. Bazin. Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts. Mém. présentés p. divers Savants a l'Académie des Sciences, 59, Paris, 1865.
13. И. И. Агроскин, Г. Т. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. Гидравлика. Госэнергоиздат, 1954.
14. L. G. Straub, E. Silbermann, H. C. Nelson. Some observations on open channel flow at small Reynolds' numbers. Proceedings ASCE, Journal Eng. Mech. Div., Vol. 82, No. 3, 1956, Paper 1031.
15. W. M. Owen. Discussion of «R. W. Powell. Resistance to flow in rough channels.» Trans. Am. Geoph. Union, Vol. 32, No. 4, 1951.
16. Yuichi Iwagaki. Discussion of «W. M. Owen. Laminar to turbulent flow in a wide open channel.» Transactions ASCE, Vol. 119, 1954.
17. C. F. Colebrook. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. Journal of the Inst. of Civil Engineers, Vol. 11, No. 4, 1938—1939.
18. G. de Marchi. Correnti uniformi entro grandi condotte e grandi canali «L'Energia Elettrica», No. 8, 1936.
19. J. Allen and A. Shahwan. The resistance to flow of water along a tortuous stretch of the river Irwell. Proc. Inst. Civ. Eng., Part III, Vol. 3, No. 1, 1954.
20. L. A. Тепакс. Energiakaod voolamisel prismaatilistes sängides. kand. diss., Tallinn, 1947.

21. В. Р. Лозанский. Влияние шероховатости на пропускную способность открытых русел при спокойном и бурном состоянии потока. Дисс. канд. наук, Харьков, 1956.
22. В. Н. Гончаров. Основные динамики русловых потоков. Гидрометеоздат, Ленинград, 1954.
23. Е. Е. Овчаров. Гидравлические сопротивления при равномерном движении жидкости в открытых руслах. Дисс. канд. наук, Москва, 1955.
24. А. К. Ахундов. Закономерности сопротивления и распределения скоростей в прямоугольных шероховатых лотках при равномерном турбулентном режиме потока жидкости. Дисс. канд. наук, Москва, 1948.
25. A. T. Irpen and R. P. Verma. The motion of discrete particles along the bed of a turbulent stream. Proc. Minnesota Intern. Hydraulics Convention, Minneapolis, 1953.
26. H. Morris. A new concept of flow in rough conduits. Proc. ASCE, No. 390, 1954.
27. I. Nikuradse. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. VDI Forschungsheft 361, Ausgabe B, Band 4, 1933.
28. Ф. А. Шевелев. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. Госиздат. лит. по строит. и архит., 1953.

VOOLUTAKISTUSE UURIMINE LAHTISTES PRISMAATILISTES SÄNGIDES

Kokkuvõte

Töös kirjeldatakse 1957—1958. a. Moskva Veemajanduse Inse-neride Instituudi hüdraulika laboratooriumis teostatud voolu-takistuse eksperimentaalseid uurimusi mitmesuguse ristlõike-kujuga (parabool, kolmnurk, trapets) lahtistes prismaatilistes rennides. Vee voolu neis rennides uuriti sängi pinna mitmesuguse kareduse: sileda (klaas, valge plekk), betoon- ja kahesuguse eri-neva kunstliku liivkaredusega kaetud pinna puhul. Katseid teos-tati laias Reynoldsi ($10\,000 < Re < 550\,000$) ja Froude'i arvu ($0,07 < Fr < 11,70$) diapsoonis, hõlmates sealjuures ka vähe-uuritud käreda voolu tsooni. 428 katse tulemused on kantud joo-nistele 3 ÷ 6.

Katsete alusel tehakse järgmised järeldused:

1) Lahtiste hüdrauliliselt siledate sängide puhul on voolu-takistus mistahes ristlõikekujuga sängis küllaldase täpsusega avaldatav ümmarguste siledate torude jaoks tuletatud Prandtl — Nikuradse valemiga.

2) Tehnilise (betoon-) kareduse korral on takistuskõverad $\lambda = f(Re)$ üleminekutsoonis langeva iseloomuga nagu vastavad kõverad samasuguse karedusega torude puhul.

3) Millise tahes kunstliku liivkaredusega kaetud lahtise sängi puhul on takistuskõverad üleminekutsoonis Re suurenedes tõusva iseloomuga.

4) Voolutakistus lahtistes Re sängides sõltub sängi ristlõike-kujust. Suurim takistus esines sama kareduse ja hüdraulilise raadiuse puhul trapetsoidaalses, väiksem — paraboolses sängis. Ristlõikekujust tingitud voolutakistuse erinevused on siledate sängide puhul tühised, kasvavad aga sängi relatiivse kareduse suurenedes.

5) Käreda voolu puhul liivkaredusega kaetud sängis on voo-lutakistuse seaduspärasus erinev vastavast seaduspärasusest rahuliku voolu korral. Katsed ei tõesta aga erineva takistussea-duse olemasolu sileda ja betoonpinnaga sängi puhul.

EXPERIMENTS WITH FLUID FRICTION IN OPEN PRISMATIC CHANNELS

Summary

The author reports the results of experiments in open channel flows, namely in a parabolic, triangular and trapeziform canal with various roughnesses of bed and sides (smooth, cement and sand roughness — uniform as well as non-uniform). The Reynolds' number varied from 10,000 to 550,000, the Froude number from 0.07 to 11.70. The experiments include 428 tests (Fig. 3 ÷ 6).

For smooth canals the tests confirm the reliability of the formula of Prandtl relating to smooth pipes.

The experimental curves for naturally rough canals (cement) have a descending character as is typical for pressure pipes of similar roughness.

For sand roughness (uniform as well as non-uniform) the curves $\lambda = f(\text{Re})$ exhibit a typical «Nikuradse's harp», so that the friction factor in the transition region is smaller than in the rough zone. At high values of the Froude number the values of the friction factor decrease and are smaller than in the so-called «rough region» of friction.

The shape of the cross section has some influence on the value of the coefficient of friction, at equal roughness and mean radius, and this influence increases with the increase of the roughness of the canal.

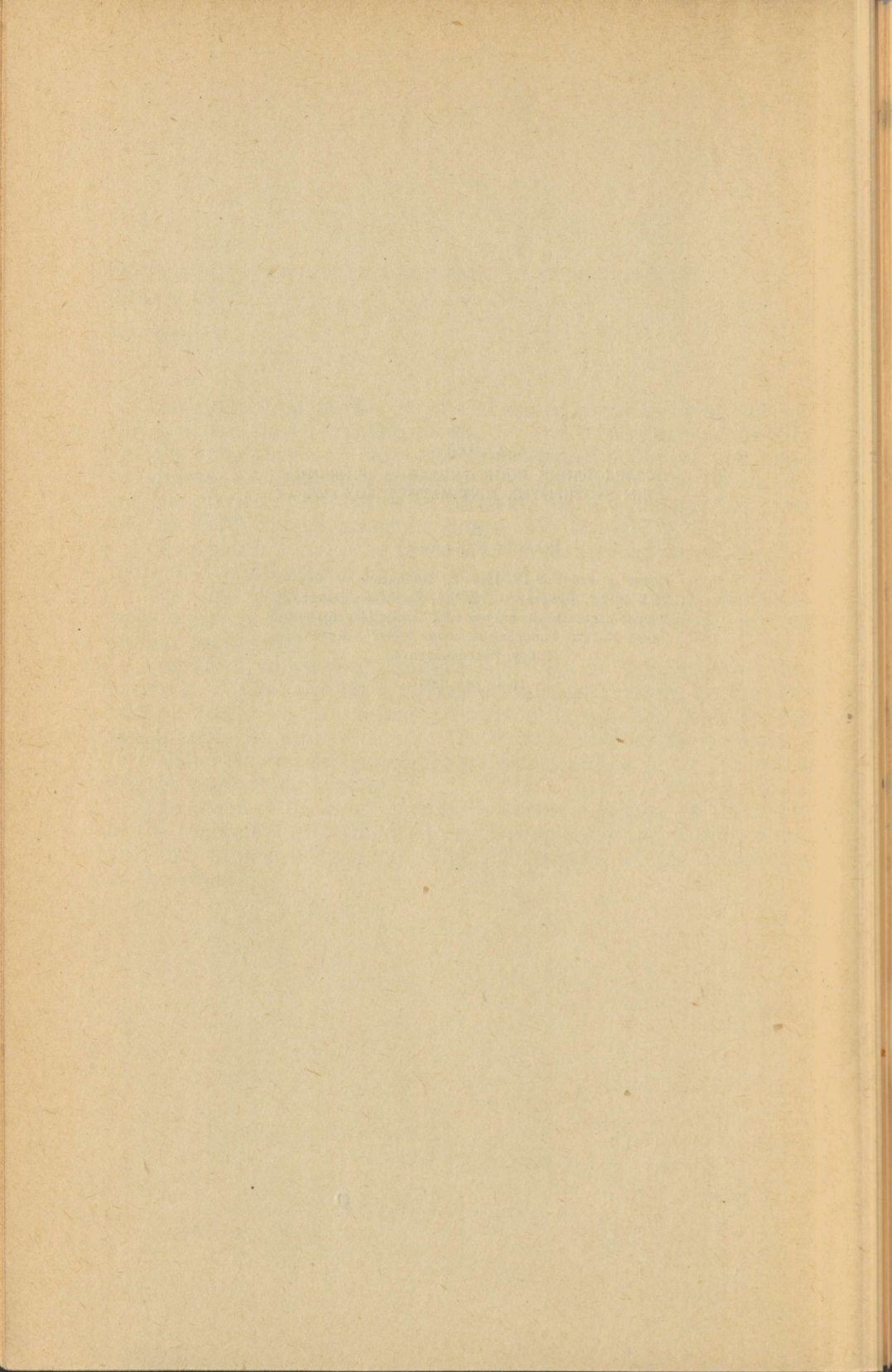
А. А. Маастик
ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ
ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

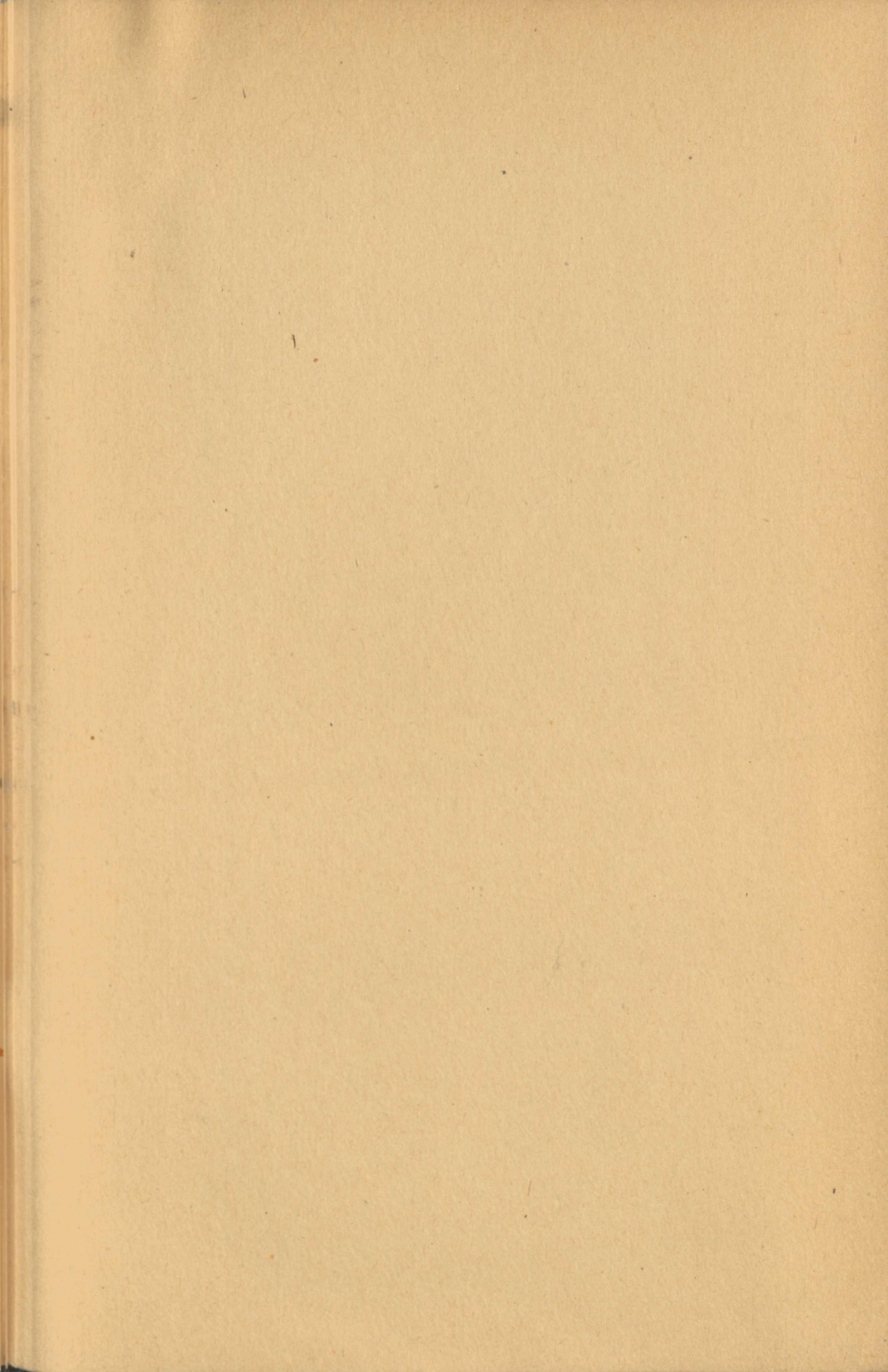
*

Редактор Х. Кальдре

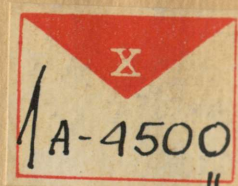
Сдано в набор 9 IV 1959 г. Подписано к печати
26 V 1959 г. Бумага 60×92, $\frac{1}{16}$. Печатных листов 2.
Учетно-издательских листов 1,82. Тираж 800. МВ-04801.
Заказ № 1528. Типография имени Ханса Хейдеманна,
Тарту, Валикраави 4.

Цена рбл. 1.20

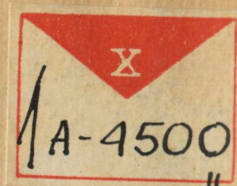




Руб. 1.20



Руб. 1.20



ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
11	12 снизу	$R_{cp_n^n} =$	$R_{cp_n} =$
29	10 снизу	... lahtistes Re sängides lahtistes sängides ...

Tell. 1528.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
11	12 снизу	$R_{cp_n^n} =$	$R_{cp_n} =$
29	10 снизу	... lahtistes Re sängides lahtistes sängides ...

Tell. 1528.