

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ В НАПОРНЫХ РЫБОПРОВОДАХ

Кандидат технических наук И. И. Теслин

Введение

Быстрое развитие и широкое внедрение гидромеханизации во многие отрасли промышленности СССР невозможно без знания закономерностей, лежащих в основе процесса движения различных неоднородных сред.

О сопротивлении при движении в трубах двухфазных газожидкостных смесей, например, воды и пара, воды и воздуха, накопился уже значительный экспериментальный и теоретический материал. Однако этого нельзя сказать о движении таких неоднородных сред, как канализационные отходы, смесь воды и торфа, воды и песка и особенно воды и рыбы. О специфических законах сопротивления смеси воды и рыбы при движении ее в трубах, насколько нам известно, отсутствуют литературные данные, кроме статьи Н. Ф. Чернигина [3]. В своей работе Н. Ф. Чернин без достаточных оснований пришел к следующим выводам:

1. «Транспортировка смеси рыбы с водой без повреждения крупной рыбы возможна на расстоянии до 700 и, повидимому, до нескольких тысяч метров».

2. «Транспортировка рыбы с водой по трубопроводу полностью сохраняет первоначальное качество рыбы-сырца».

3. «Трубопроводы для перекачки надо укладывать с постоянным уклоном в одну сторону. Если это требование невозможно, то на высоких частях трубопровода должны быть сделаны отверстия для постоянного выпуска воздуха».

4. «Расчет стальных трубопроводов для перекачки смеси рыбы с водой можно производить по тем же формулам гидравлики, что и для простого водопровода, если концентрация смеси не превышает 30% содержания рыбы».

Первые три вывода по меньшей мере являются общими и возможны, как это будет показано ниже, в некоторых частных случаях и при определенных условиях, а последний вывод совершенно необоснован.

Рассмотрим каждый из этих выводов более подробно. Действительно, «транспортировка смеси рыбы и воды без повреждений крупной рыбы возможна» на далекие расстояния. Однако, как показали наши исследования сопротивления смеси воды и различных промысловых видов рыб Азово-Черноморского бассейна при движении их в прямых напорных трубах, это утверждение Н. Ф. Чернигина возможно лишь при соответствующей скорости движения водо-рыбного потока и далеко не для всяких рыб и не во всякой стальной трубе. Например, при перекачке смеси воды и леща в технически гладкой трубе диаметром (d) 10" в производственных условиях работы 10" рыбонасоса, установленного на Азовском

рыбокомбинате, при скорости смеси 1,0—1,2 м/сек. было получено 0,12% брака, а при скорости 2,5—3,4 м/сек. повреждение леща и судака достигало 5—8%. Еще больше брака было во время опытов по перекачке хамсы примерно при этих же скоростях и тоже в технически гладкой (внутри шлифованной) трубе $d = 103$ мм, установленной на опытном стенде Керченского рыбокомбината. Поэтому и второй вывод Н. Ф. Чернигина является также общим, не конкретным.

Качество перекачиваемой по трубам рыбы зависит не только от скорости смеси, но и от времени и температуры ее хранения. Во время перекачивания в Порткатоне по 4" трубопроводу только что уснувшей тюльки лопанца было не более 0,1%, а во время перекачивания при той же скорости и по тому же трубопроводу тюльки, которая находилась после улова в байде в течение 4—8 часов, лопанца было до 10%.

Третий вывод Н. Ф. Чернигина также недостаточно конкретен. Чернигин говорит, что надо укладывать трубопровод «с постоянным уклоном в одну сторону». Однако если укладывать трубопровод с уклоном по направлению движения потока жидкости, то он работает хуже, чем тогда, когда его укладывают с уклоном, обратным движущемуся потоку; так как в первом случае находящийся в трубопроводе и выделяющийся из жидкости воздух движется навстречу перекачиваемому потоку и создает тем самым добавочное сопротивление и пульсации. Н. Ф. Чернигин почему-то ничего не говорит об этом и даже ставит знак равенства между уклонами трубопроводов, направленными по течению потока и против него.

Четвертый вывод является совершенно неверным, так как не вытекает из содержания работы. Автор не сообщает ни методики исследования, ни самих опытов и их результатов, ни литературных источников. Повидимому, Н. Ф. Чернигин делает этот вывод на базе умозрительного рассуждения или же на основании постулированного предложения О'Бриена, не упоминая о нем. По утверждению О'Бриена, сопротивления, вызываемые движением любой смеси, можно определять по обычным формулам гидравлики, если умножить полученный результат на величину, равную удельному весу смеси, протекающей в трубе. Это утверждение, как будет показано ниже, не имеет никакого основания. Однако многие работники, в том числе и Н. Ф. Чернигин, связанные с расчетом устройств по транспортировке неоднородных дисперсных сред, исходя, повидимому, из постулата О'Бриена, считают, что можно рассчитывать потери напора при движении смеси воды и рыбы в трубопроводах по формулам, применимым для воды, имея в виду, что удельный вес свежей рыбы мало отличается от удельного веса воды.

Влияние концентрации рыбы, находящейся в составе перекачиваемой смеси, до настоящего времени никем не изучалось. Поэтому также необоснованным является утверждение Чернигина, что «по объективным наблюдениям» 30% концентрации рыбы не влияет на величину сопротивления, вызываемого смесью воды и этой рыбы при ее движении в трубах.

Лаборатория механизации ВНИРО в 1950 г. впервые приступила к исследованию сопротивления смеси воды и рыбы при движении ее в различных напорных трубопроводах рыбонасосных установок с центробежными рыбонасосами диаметром 100 и 250 мм.

На основании экспериментальных исследований, проведенных в 1950 г. на Азовском и Керченском рыбокомбинатах, нам удалось выявить некоторые характерные закономерности, знание которых позволяет уже сейчас сделать необходимые выводы о величине потери давления при движении смесей: а) воды и леща, воды и судака в трубах $d = 10''$; б) воды и тюльки и воды и хамсы в трубах $d = 4''$; в) воды и хамсы в трубах $d = 5$ и $6''$.

Методика исследования

Сопrotивление движению смеси воды и рыбы в напорных горизонтальных трубах исследовали на базе двух хотя и сходных, но принципиально различных методик. На основании первоначальной методики была смонтирована опытная установка, служившая для определения смеси воды и леща, воды и судака при движении в трубе диаметром 255 мм (рис. 1). По этой же методике определяли и сопротивление смеси воды и тюльки, транспортировавшейся по трубе рыбонасосной линии Порткатоновского рыбного цеха диаметром 105 мм (рис. 2).

На этих установках опыты ставили при обычном режиме производственной работы рыбонасосной линии, когда неизбежно происходят колебания в расходах рыбы. В результате этих колебаний концентрации рыбы в составе транспортируемой смеси изменялось сопротивление в рыбонасосной линии; поэтому трудно было определить точную производительность рыбонасоса, в частности, приведенную скорость движения воды, т. е. скорость, которая была бы, если по трубе двигалась только вода.

Таким образом, на указанных выше установках нельзя получить постоянных величин, характеризующих водорыбную смесь. Кроме того, нельзя регулировать в производственных условиях температуру водорыбной смеси. Эти два обстоятельства не дают возможности построить кривую зависимости потери напора от факторов, обуславливающих эту потерю, т. е. от концентрации рыбы, вязкости воды и др.

Чтобы устранить эти и некоторые другие методические недостатки, присущие первой и второй опытным установкам (рис. 1, 2), впоследствии мы провели исследование на основании другой, более совершенной методики.

На разработанной по этой методике установке, смонтированной на территории холодильника Керченского рыбокомбината (рис. 3), были поставлены опыты с различной концентрацией рыбы при постоянном расходе воды, находящейся в составе исследуемой смеси. При эксплуатации этой установки невозможно изменение шероховатости в опытных трубах, происходящее особенно заметно под действием морской воды; кроме того, она имеет участки труб с прозрачными стенками для визуального наблюдения, устройство для промывки трубок забора давления, а также предусмотрены и другие приспособления.

Кроме того, на установке возможны опыты путем циркуляции исследуемого потока по замкнутому контуру, сделано устройство для измерения расхода воды, необходимой для того, чтобы приведенная скорость воды была постоянной, и др. Более полное представление о сущности принятых нами методик исследования можно легко получить на основании описания устройств опытных установок и опытов, приведенных ниже.

1 опытная установка

Установка, на которой велись опыты по определению сопротивления трению смеси воды с живым и только что уснувшим лещом или судаком, показана на рис. 4. Эта установка была смонтирована и установлена на плоту Азовского рыбного цеха в апреле 1950 г.

Опытный участок

Как видно из рис. 1, опытный участок изготовлен из стальной трубы длиной 6000 мм, внутренний диаметр его 255 мм; он имел подъем по направлению движения потока, равный 1 : 100, и расстояние между сверлениями для трубок отбора давления по 2500 мм. В эти сверления, сделанные по прямой линии образующей трубы, ввинчивали штуцеры внутренним диаметром 2 мм, на которые надевали резиновые трубки, идущие от дифференциального манометра.

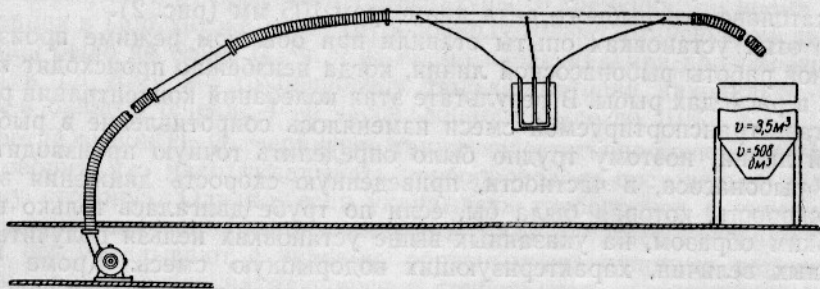


Рис. 1. Схема первой опытной установки.

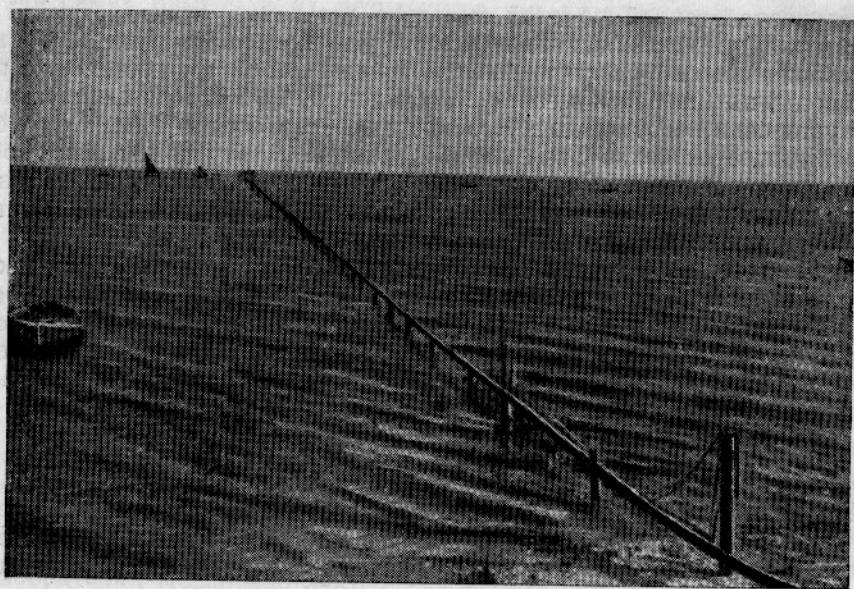


Рис. 2. Напорный рыбопровод в Порткатоне.

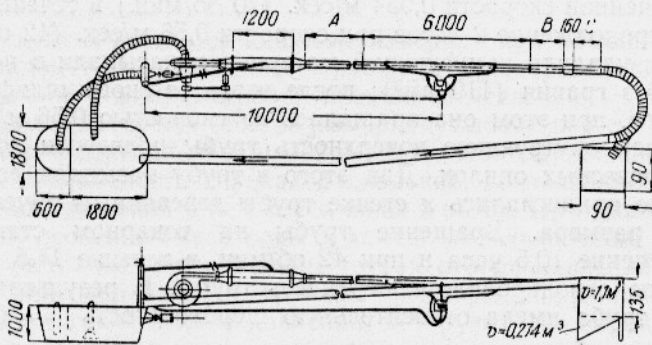


Рис. 3. Схема опытной установки на Керченском холодильнике.

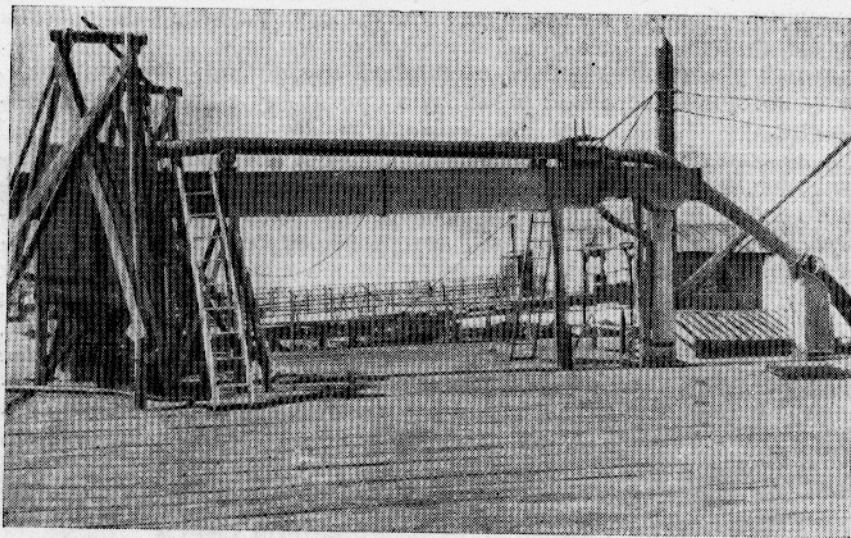


Рис. 4. Общий вид опытной установки на Азовском комбинате.

Чтобы определить зависимость сопротивления при движении водорыбной смеси в трубах от их диаметров, производили шлифовку внутренних стенок трубы опытного участка. В трубу насыпали шлифующий материал (110 дм³), состоящий из 62 дм³ песка и 48 дм³ гравия, что составляет 23 дм³ на 1 м² поверхности трубы. После наполнения трубы шлифующим материалом концы ее глушились. Затем трубу крепили на токарном станке, при этом патрон токарного станка один конец ее зажимал, а другой — закрепляли на деревянном люнете (стойке).

Установленная таким образом труба вращалась на токарном станке сначала при линейной скорости 0,934 м/сек. (70 об/мин.) в течение 13 часов, а затем в продолжение 2 часов при скорости 0,56 м/сек. (42 об/мин.). Затем из трубы удалили шлифующий материал и насыпали в нее сухой речной песок без гравия (110 дм³); после этого ее снова шлифовали в течение 14 часов, при этом она вращалась со скоростью 0,56 м/сек.

В дальнейшем внутреннюю поверхность трубы подвергли полировке при помощи древесных опилок. Для этого в трубу насыпали древесные опилки, которые прижимались к стенке трубы деревянным брусом соответствующего размера. Вращение трубы на токарном станке при 70 об/мин. в течение 10,5 часа и при 42 об/мин. в течение 14,5 часа достаточно хорошо отполировало поверхность трубы. В результате такой обработки эта труба имела относительную шероховатость $\epsilon = 0,000458$.

Начальный участок и отводящая труба

Начальный участок представлял собой гладкую резиновую трубу $d = 10''$, длиной 2,5 м. Эта труба имеет небольшую кривизну. Кроме того, длина начального участка меньше той длины, которая необходима для установившегося профиля скоростей для движения воды.

Учитывая эти обстоятельства, мы обработали опытный материал соответствующим образом, о чем будет сказано в разделе «Обработка опытного материала».

Начальный участок соединили с опытной трубой при помощи фланцев, между которыми вставили резиновую прокладку с хорошо зачищенными краями.

Чтобы не возникала добавочная турбулизация потока в месте соединения фланцев, внутренний диаметр прокладки был на 1,5 мм больше внутреннего диаметра опытной трубы. С этой же целью тщательно зачищали заусеницы, выступы и кромки, которые образовывались при сверлении отверстий под штуцеры для трубок забора давлений, соединявших опытную трубу с дифференциальным манометром. Конец опытной трубы весьма тщательно соединяли с резиновым шлангом диаметром 255 мм, длиной 1,5 м, чтобы не возникало добавочное так называемое «местное сопротивление». Во время опытов шланг находился по вертикали в соосном с опытной трубой направлении, а по горизонтали отклонялся не более 12°. Для этого подвешивали над трубой таль, а измерительный бункер устанавливали вплотную к концевому резиновому шлангу.

Измерение параметров водорыбной смеси

Измерение расходов воды и смеси воды и рыбы

Расход воды и смесь воды и рыбы измеряли объемным способом в специально изготовленном деревянном бункере емкостью 3,5 м³. Для герметичности в бункер вставляли изготовленный из оцинкованной жести кожух. Этот квадратного сечения бункер в нижней части заканчивался четырехугольной усеченной пирамидой емкостью 508 дм³. В нижнюю часть этой пирамиды сделан металлический люк, через который выпускали исследуемую смесь.

Сечение параллелепипедной части бункера равно $1,977 \text{ дм}^2$. Таким образом, одному сантиметру высоты параллелепипедной части бункера соответствует объем, равный $19,77 \text{ дм}^3$. Во всех расчетах общая емкость пирамидальной части бункера принята в 508 дм^3 , а емкость 1 см высоты параллелепипедной части — 20 дм^3 .

Для отсчета уровня наполнения бункера в нем была жестко закреплена рейка с делениями по 0,5 см.

Измерение перепада давления

Во всех случаях перепады давления измеряли при помощи дифференциальных манометров, стеклянные трубки которых укрепляли на деревянных дощечках с миллиметровой шкалой отсчета.

Как правило, во время опытов измеряли высоту перепада давления трехтрубным дифференциальным манометром. Поэтому можно было контролировать правильность перепадов давления, возникавших в опытной трубе во время движения в ней смеси воды и рыбы. При движении смеси воды и рыбы, особенно смеси воды и хамсы, довольно часто происходит полное или частичное закупоривание трубок отбора давления. В результате такого закупоривания в трубках дифференциального манометра устанавливается такая высота давления, которую легко определить трехтрубным дифференциальным манометром и трудно обнаружить двухтрубным.

Чтобы трубки отбора давления не закупоривались в результате того, что в них попадает чешуя рыбы, впоследствии начали промывать их водой, которую подводили к дифференциальному манометру по трубе (рис. 3). Необходимость такого промывного устройства выявилась в течение опытов с тьюлкой, а поэтому мы сумели создать его только лишь во время опытов с хамсой.

При режимах с большими перепадами давления трубки дифференциального манометра заполняли бромформом, (удельный) вес его 2,885, а с малыми перепадами — дихлорэтаном (удельный вес 1,25) или хлороформом (удельный вес 1,49).

Применение бункера большой емкости и дихлорэтана, хлороформа и бромформа в качестве рабочих жидкостей в дифференциальном манометре, имеющих по сравнению со ртутью малый удельный вес, обеспечило относительно высокую точность при измерении расходов водорыбной смеси и перепадов давления.

Измерение температуры

Температуру измеряли обыкновенным ртутным термометром с точностью до $0,5^\circ \text{C}$. Температуру смеси воды и рыбы измеряли в бункере не менее двух раз во время каждого опыта.

Так как вязкость воды изменяется в зависимости от температуры на небольшую величину, то для наших целей точность измерения температуры до $0,5^\circ \text{C}$ была вполне достаточной.

Рыбонасос и прочее оборудование

В течение опытов исследуемая смесь перекачивалась 10-дюймовым рыбонасосом, приводом которого был электромотор переменного тока.

Число оборотов изменяли при помощи водяного реостата в пределах от 272 до 371 в минуту, что соответствовало скорости движения смеси от 1,14 до 3,38 м/сек.

Взвешивали рыбу обычными десятичными весами с точностью до 50 г. Выпускаемую из мерного бункера рыбу полностью задерживала сетка, подвешенная внизу его.

2 опытная установка

На действующей рыбонасосной линии $d = 4''$ (рис. 5, см. рис. 2) 2-й опытной установки, смонтированной Азовским рыбокомбинатом в Порткатоне, определяли потери напора при движении смеси воды и свежей тюльки в трубе $d = 105$ мм. Уклон этой трубы равен 0. Устройство этой опытной установки принципиально ничем не отличается от вышеописанной опытной установки. Для измерения перепада давления и расхода смеси воды и рыбы использовали тот же мерный бункер и дифференциальный манометр, что и во время опытов на 1-й установке.

Разница была лишь в том, что в этой установке d опытного участка трубы равен 105 мм; после шлифовки, аналогичной описанной выше для трубы диаметром 255 мм, эта труба имела относительную шероховатость $\varepsilon = 0,000394$.

3 опытная установка

На 3-й опытной установке, смонтированной на Керченском рыбокомбинате (рис. 6, см. рис. 3), определяли сопротивление во время движения смеси воды и хамсы в трубах $d = 103, 125$ и 153 мм.

Эта установка принципиально отличается от двух первых. Работая на 3-й установке, мы имеем возможность, во-первых, осуществлять циркуляцию смеси воды и рыбы по замкнутому контуру; во-вторых, приготовить по своему усмотрению водорыбную смесь определенной концентрации; в-третьих, поддерживать во время опытов постоянное количество воды и одновременно изменять расход рыбы; в-четвертых, промывать трубки отбора давления перед началом замера перепада давления, вызываемого движением воды и рыбы в опытной трубе.

Экспериментальный участок

Все опыты со смесью воды и хамсы производились на участке (рис. 3) длиной 6 м, на котором устанавливали поочередно три опытные трубы внутренним $d = 103, 125$ и 153 мм. Эти трубы устанавливали на опытном участке с уклоном, равным для труб $d = 103$ и 153 мм $1 : 100$, и для трубы $d = 125$ мм $1 : 150$.

Расстояния между сверлениями трубок отбора давления равны 2,3 м для труб 103 и 153 мм и 2,0 м для трубы диаметром 125 мм. Последняя имела всего два сверления, в которые, как и в трубы $d = 103$ и 153 мм, ввинчивались штуцеры $d = 2$ мм. Эти штуцеры соединялись при помощи резиновых и стеклянных трубок с дифференциальным манометром; этот манометр можно быстро включать и выключать, так как на его дощечке сделан групповой зажим.

Чтобы можно было сравнить результаты опытов при исследовании движения смеси воды с судаком и лещом в трубе $d = 255$ мм и воды и тюльки в трубе $d = 105$ мм с результатами аналогичных опытов со смесью воды и хамсы в трубах $d = 103, 125$ и 153 мм, мы отшлифовали последние.

Шлифовку этих труб производили при помощи пескоструйного аппарата. Кроме того, трубы $d = 125$ и 153 мм после шлифовки оцинковывались электролитическим способом.

В результате такой обработки внутренних стенок труб и последующих гидравлических определений их шероховатости по формуле Никурадзе — Прандтля $\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 + 2,0 \lg \frac{r}{k} \right)$ были получены шероховатости, которые показаны в табл. 1.

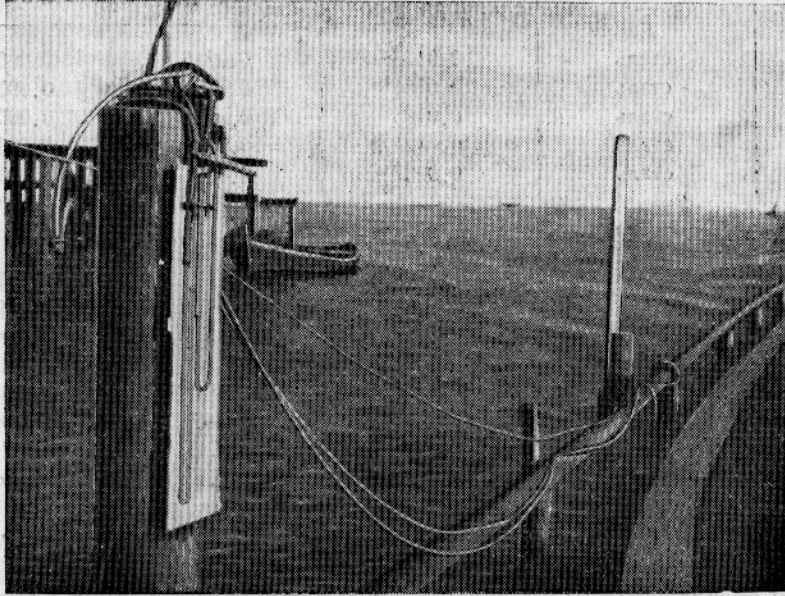


Рис. 5. Установка дифференциальных манометров на опытном участке напорного рыбопровода в Порткатоне.

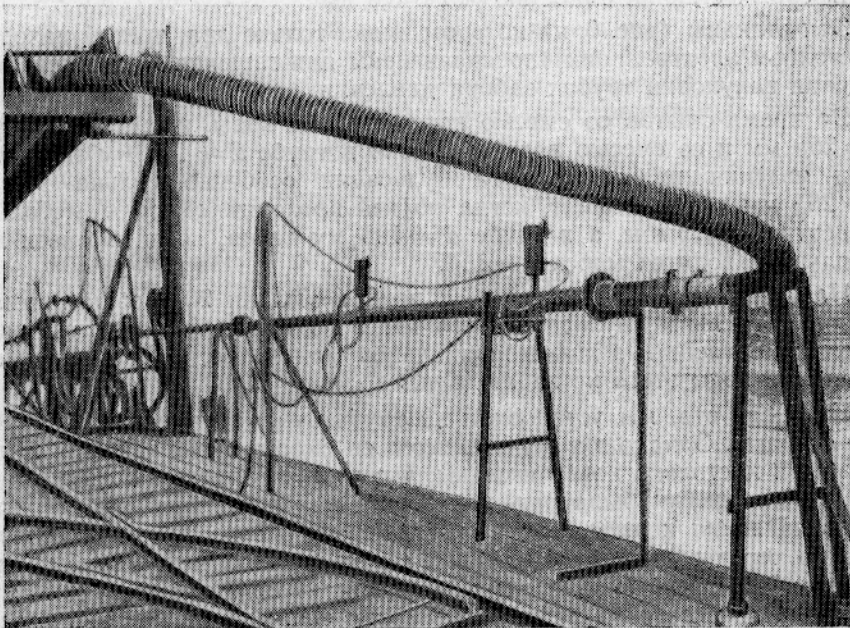


Рис. 6. Напорный рыбопровод опытной установки на Керченском холодильнике.

Таблица 1

| Диаметр трубы (в мм) | Материал трубы | Значения λ для автомобильной области | Шероховатость | |
|----------------------------|----------------|--|--------------------------|---------------|
| | | | абсолютная k (в мм) | относительная |
| 103 | сталь | 0,0178 | 0,0215 | 0,000418 |
| 105 | сталь | 0,0151 | 0,0207 | 0,000394 |
| 125 | сталь | 0,0195 | 0,0268 | 0,000478 |
| 153 | сталь | 0,0121 | 0,0282 | 0,000370 |
| 255 | сталь | 0,0237 | 0,0584 | 0,000458 |

Как видно из табл. 1, относительная шероховатость трубы $d = 153$ мм наименьшая, несмотря на то, что стенки ее обрабатывались так же, как и стенки труб $d = 103$ и 125 мм. Такое различие в величинах шероховатостей, повидимому, можно отнести за счет неодинаковой твердости металла труб. Действительно, по внешнему виду и сертификату трубы $d = 103$ и $d = 125$ мм имели одинаковую техническую характеристику, а труба $d = 153$ мм отличалась от них и принадлежала к типу обсадных нефтепроводных труб.

Отсюда следует, что утверждение проф. А. П. Юфина [4] о том, что после пропускания через трубы различных диаметров песчаного грунта (в количестве 60 000 кг) и воды достигается в них одинаковая относительная шероховатость, не совсем точно.

Это явление можно наблюдать лишь тогда, когда разница в твердости металла шлифуемых труб небольшая. При большой же разнице в твердости стенок труб различную первоначальную шероховатость сделать одинаковой нам не удалось.

На всех опытных трубах, применявшихся для исследования сопротивления при движении смеси воды и хамсы, были установлены по три демпферных стакана емкостью около 0,6 дм³.

Эти стаканы (рис. 6, на котором видно только два, третий находится за столбом электролинии) предназначены для гашения пульсации и устранения закупорки трубок забора давления.

Во время опытов со смесью воды и леща, воды и судака в трубе $d = 255$ мм и со смесью воды и тюльки в трубе $d = 105$ мм мы наблюдали явления пульсации. Эта пульсация особенно сильна в трубе $d = 255$ мм в тот момент, когда по ней проходит смесь с небольшой концентрацией рыбы, а в трубе $d = 105$ мм тогда, когда в смеси воды и тюльки находится морской ерш¹.

Например, присутствие в смеси воды и тюльки 20% ерша вызывало настолько сильные пульсации, что мы с большим трудом отсчитывали перепады давлений на дифференциальном манометре; во время движения же чистой воды этого не наблюдали.

Учитывая это, мы установили на трубах упомянутые выше демпферные стаканы. Однако в течение опытов со смесью воды и хамсы пульсации были настолько незначительны, что точность отсчета перепадов давления практически была одинаковой как при присоединении трубок отборов давления к этим стаканам, так и при отборе давления непосредственно через штуцеры, ввинченные в сверления опытной трубы. Таким образом, демпферные стаканы в основном улавливали чешую и другие отходы. Однако это до некоторой степени снижало возможность засорения трубок отбора давления.

¹ Явление пульсации возможно обусловлено не самой природой водорыбной смеси, а плохим состоянием внутренней поверхности рыбопровода.

Начальный участок и отводящие трубы

Начальный участок (рис. 3) во всех случаях имел длину, вполне достаточную для того, чтобы профиль скорости исследуемой смеси при входе ее в опытную трубу был постоянен. Для трубы $d = 103$ мм он равнялся $45d$, а для труб $d = 125$ и 153 мм соответственно — 37 и $28d$.

Впереди начального участка находилась труба 6", длиной 1,2 м, к которой примыкал переход. Разумеется, переход соответствующего диаметра ставили только для опытов с трубами $d = 103$ и 125 мм. Во время опытов с трубой $d = 153$ мм этот переход устанавливали за визуальным участком (рис. 7) для соединения с гибким шлангом $d = 4"$, по которому поток жидкости направляется в мерный бункер или гидрожелоб.

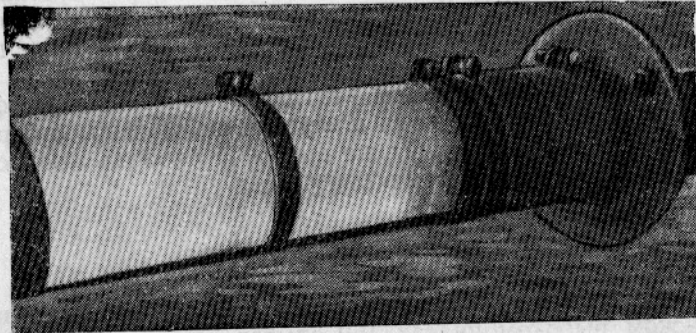


Рис. 7. Визуальный участок.

Непосредственно за опытным участком трубы присоединяли на фланцах так же тщательно, как и фланец опытной трубы с начальным участком, достаточно гладкий участок трубы длиной 0,87 м для трубы $d = 103$ мм, 1,47 м для трубы $d = 125$ мм и 1 м для трубы $d = 153$ мм.

К концам труб $d = 103$ и 153 мм присоединяли визуальные участки таких же диаметров длиной 0,60 и 0,76 м, изготовленные из плексигласа. Таким образом, во всех опытах с трубами диаметром 103, 125 и 153 мм концевые участки, которые укладывали непосредственно за опытными трубами, имели длину более 11.

Передний конец визуального участка соединяли с концевым участком при помощи резиновой муфты, а на задний его конец надевали гибкий шланг.

Чтобы концевые визуальные участки трубы всегда находились в соосном положении с опытной трубой, их жестко закрепляли на неподвижной опоре (рис. 7).

Измерение расходов исследуемой смеси воды и хамсы и других величин

Расходы смеси воды и хамсы измеряли объемным способом, который описан в разделе «1 опытная установка».

Правда, при измерении расхода смеси воды и хамсы мерный бункер несколько отличался по конструкции; и по размеру он меньше бункера, применявшегося в 1-й опытной установке. Поэтому объем пирамидальной части мерного бункера равен 274 дм³, общая его емкость — $1,1$ м³; 1 см высоты этого бункера соответствовал 8 дм³.

Для измерения расхода воды во время опытов была установлена диафрагма на трубе $d = 2"$, по которой подавали воду при помощи водяного насоса в напорную трубу. Расход воды через диафрагму измеряли дифференциальным манометром, который заливали обычно ртутью. Чтобы

вода не поступала из моря в циркуляционный контур рыбонасосной установки и этим самым не изменяла концентрацию рыбы в замкнутой системе опытной установки, ее всасывание рыбонасосом производилось из того же чана, где готовилась водорыбная смесь.

С этой целью была устроена сетчатая перегородка в чане, которая задерживала хамсу, но пропускала воду. Таким образом, погружая шланг водяного насоса в ту часть чана, где находилась вода, а шланг рыбонасоса в отделение, где была смесь воды и хамсы, можно поддерживать постоянными концентрацию рыбы и скорость воды.

Перепад давления, в результате движения смеси воды и хамсы в трубах $d = 103$ и 153 мм, измеряли во время опытов трехтрубным дифференциальным манометром, а в трубе $d = 125$ мм — двухтрубным.

В зависимости от величины перепада эти дифференциальные манометры заливали бромформом, хлороформом или дихлорэтаном.

Перед началом измерения перепада давления дифференциальный манометр промывали водой из специально для этого подведенной трубы.

На трубе открывали водяной вентиль и выключали дифференциальный манометр; после этого вода поступала по трубкам отбора давления снаружи внутрь опытной трубы, не вытесняя рабочей жидкости, находящейся в дифференциальном манометре.

Проведение опытов

На трех опытных установках (стендах) было проведено на Азовском и Керченском рыбокомбинатах 169 опытов, из которых 107 опытов по определению сопротивления движению смеси воды с рыбой и 62 опыта только с водой (табл. 2).

Таблица 2

| Диаметр опытной трубы (в мм) | Количество опытов | | Опытная рыба |
|------------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
| | со смесью воды и рыбы | с чистой водой | |
| 103 | 39 | 18 | хамса |
| 105 | 16 | 8 | |
| 125 | 10 | 12 | тюлька |
| 153 | 15 | 10 | хамса |
| 255 | 27 | 14 | хамса |
| | 107 | 62 | лещ и судак |

Концентрация и длина рыбы во время опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Диаметр опытной трубы (в мм) | Название опытной рыбы | Концентрация рыбы | | | | Промысловая длина рыбы (в см) |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|----------------------------|--------------|--|
| | | в частях рыбы к воде | | $c = \frac{Q_{см}}{Q_{в}}$ | | |
| | | минимальная | максимальная | минимальная | максимальная | |
| 103 | Хамса | 0,04 : 1 | 1,02 : 1 | 1,04 | 2,022 | От 5 до 8 |
| 105 | Тюлька | 0,04 : 1 | 0,31 : 1 | 1,04 | 1,310 | " 4 до 6 |
| 125 | Хамса | 0,04 : 1 | 0,33 : 1 | 1,04 | 1,33 | " 5 до 8 |
| 153 | Хамса | 0,08 : 1 | 0,59 : 1 | 1,078 | 1,587 | " 5 до 8 |
| 255 | Лещ, судак | 0,003 : 1 | 0,122 : 1 | 1,003 | 1,122 | " 19 до 29 (лещ) " 24 до 45 (судак) |

В течение опытов в трубе $d = 255$ мм судак и лещ были живые (до 90%), а остальные уснувшие. Тюлька же и хамса во всех случаях были уснувшие, но вполне свежие, иногда даже находились в состоянии трупного окоченения.

До начала опытов по определению потерь давления движущейся в трубе смеси воды и рыбы определяли потерю напора в этой трубе при движении в ней чистой воды. Полученные результаты показаны на рис. 8—12 в логарифмических координатах [$\lg Re$, $\lg(100\lambda)$].

Как видно из этих рисунков, на ординатах нанесены коэффициенты сопротивления трению, вычисляемые по формуле Дарси — Вейсбаха, а по осям абсцисс отложены логарифмы чисел Рейнольдса.

В соответствии с законом Блазиуса расположение этих точек на прямой подтверждает правильность проводимых нами опытов с водой и, следовательно, правильность методики, предназначенной для исследования сопротивления при движении в этих трубах смеси воды и рыбы. Кроме того, во время опытов

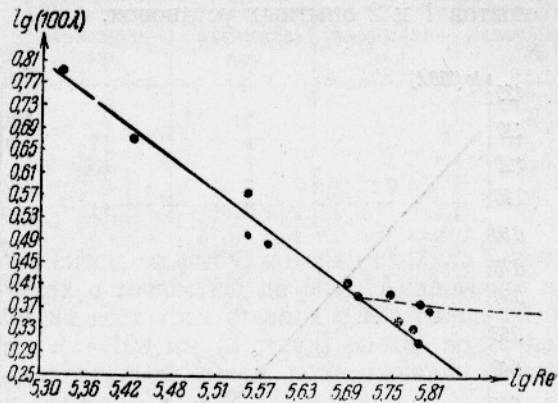


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения воды о стенки трубы $d=255$ мм от критерия Рейнольдса (в логарифмических координатах).

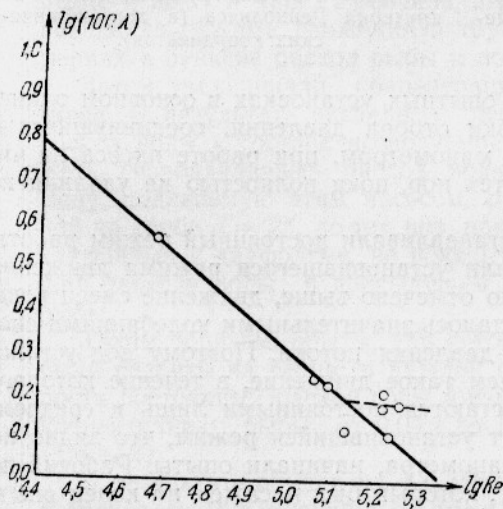


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения воды о стенки трубы $d=105$ мм от критерия Рейнольдса (в логарифмических координатах).

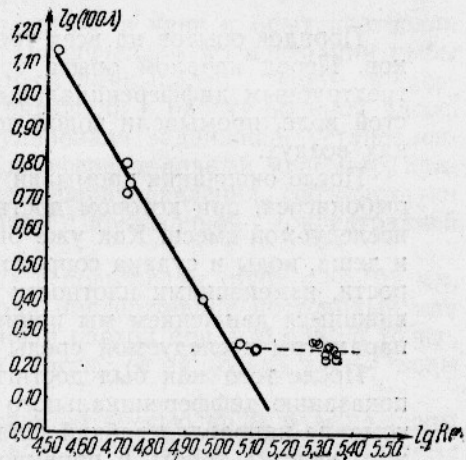


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения воды о стенки трубы $d=103$ мм от критерия Рейнольдса (в логарифмических координатах).

с водой мы стремились в отдельных случаях достигнуть таких скоростей, при которых коэффициент трения выходит за пределы действия закона Блазиуса ($\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$), когда λ находится в автомодельной области, т. е. зависит только от шероховатости трубы.

Опытные точки на графиках (рис. 8—12), соответствующие большим числам Рейнольдса, расположены приблизительно параллельно оси абс-

цисс. Мы воспользовались коэффициентами (λ) из автоточечной области для определения шероховатостей исследуемых нами труб и коэффициентами трения (λ), которые лежат на прямой, соответствующей закону Блазиуса, — для обработки результатов опытов по сопротивлению смеси воды и рыбы. Благодаря коэффициентам трения (λ), полученным при опытах с водой, представилась возможность произвести обработку опытов 1 и 2 опытных установок.

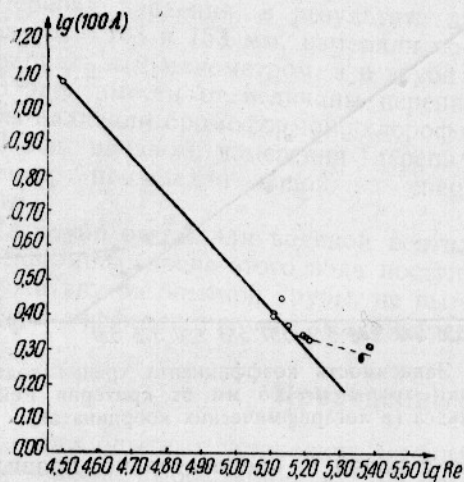


Рис. 11. Зависимость коэффициента трения воды о стенки трубы $d=125$ мм от критерия Рейнольдса (в логарифмических координатах).

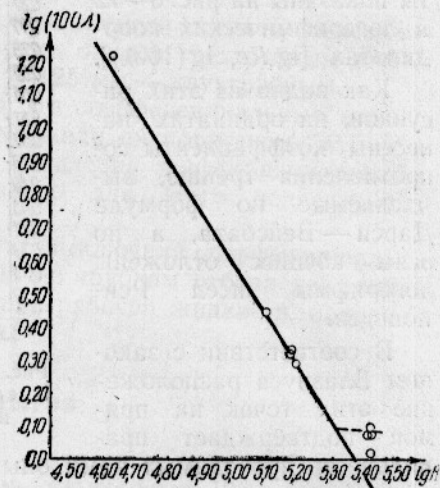


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения воды о стенки трубы $d=153$ мм от критерия Рейнольдса (в логарифмических координатах).

Порядок опытов на всех трех опытных установках в основном одинаков. Перед началом опыта трубки отбора давления, соединявшиеся с трехтрубным дифференциальным манометром, при работе насоса на чистой воде, промывали водой до тех пор, пока полностью не удалили из них воздух.

После окончания промывки устанавливали постоянный режим работы рыбонасоса, при котором достигали установившегося режима движения исследуемой смеси. Как уже было отмечено выше, движение смеси воды и леща, воды и судака сопровождалось значительными колебаниями скорости, изменениями плотности и давления потока. Поэтому под установившимся движением мы понимаем такое движение, в течение которого параметры исследуемой среды остаются постоянными лишь в среднем.

После того как был достигнут установившийся режим, что видно по показанию дифференциального манометра, начинали опыты. Рабочий по команде направлял гибкий шланг, который был насажен на конец опытного участка трубы, в приемно-измерительный бункер. Во время наполнения этого бункера водой или смесью воды и рыбы при помощи секундомера измеряли время наполнения и отсчитывали не менее трех раз показания перепада давлений на трехтрубном дифференциальном манометре. Как только бункер наполнялся приблизительно до 0,8 емкости, шланг из него убирал и одновременно прекращали отсчет перепадов давления на дифференциальном манометре.

Затем отсчитывали уровень наполнения бункера по специально вделанной в него рейке с точностью 0,5 см, что соответствовало 10 л, или около 0,3% при работе на 1-й и 2-й установках, и 4 л при работе на 3-й установке.

Воду или смесь из бункера выпускали через специальный люк, вмонтированный в нижнюю часть бункера, и одновременно замеряли темпе-

ратуру воды, которая была всегда постоянной в течение одного опыта; для всех опытов она находилась в пределах, указанных в табл. 4.

Таблица 4

| Диаметр опытной трубы (в мм) | Название опытной рыбы | Температура (в °С) | | | |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | смеси воды и рыбы | | воды | |
| | | минималь- ная | максималь- ная | минималь- ная | максималь- ная |
| 103 | Хамса | 8 | 12 | 11 | 12 |
| 105 | Тюлька | 11 | 4 | 12 | 16,5 |
| 125 | Хамса | 4 | 4 | 4 | 4,5 |
| 153 | Хамса | 9 | 9 | 9 | 12 |
| 255 | Лещ, судак | 11 | 16 | 11 | 12 |

Если в бункере находилась смесь, то рыбу, которая входила в состав этой смеси, взвешивали на весах с точностью до 50 г. Аналогично проводили и последующие опыты на всех трех стендах с той разницей, что при опытах с хамсой на трубе $d = 103$ мм (3 стенд) расход воды, находящейся в составе экспериментируемой смеси, поддерживали постоянным. Это делали следующим образом.

Диафрагму (рис. 3) до начала опытов тарировали, пропуская через нее воду. На основании результатов этой тарировки вычерчивали кривую зависимости расхода от высоты перепада давления. Этот график давал возможность добавлять необходимое количество воды в водорыбную смесь, которая перемещалась по опытной трубе. В этом случае порядок опытов следующий: приготавливали определенной концентрации смесь рыбы и воды в чане, включали в работу рыбонасос, достигали установившегося режима движения в трубе водорыбной смеси и, наконец, измеряли в бункере расход рыбы и воды.

Затем увеличивали концентрацию рыбы в чане и опыт повторяли снова. В результате оказалось, что с увеличением концентрации рыбы расход воды в составе исследуемой смеси уменьшался. Чтобы поддержать первоначальный расход воды, включали в работу водяной насос. Воду, подаваемую этим насосом, регулировали задвижкой, установленной на трубе $d = 2''$, до тех пор, пока дифференциальный манометр, подключенный к диафрагме, не показывал перепад давления, соответствующий расходу воды в предыдущем опыте с пониженной концентрацией рыбы.

Таким образом, опыты, для которых использовали трубу $d = 103$ мм, были разбиты на серии; в каждой серии поддерживали постоянный или почти постоянный расход воды и изменяли расход или, что одно и то же, концентрацию рыбы от 0,04 до 1,02 части ее на одну часть воды (табл. 3).

В результате опытов на 1-й установке со смесью воды и леща, воды и судака, на 2-й установке со смесью воды и тюльки и на 3-й установке со смесью воды и хамсы (трубы $d = 125$ и 153 мм) были получены локальные опыты. Эти опыты характерны тем, что в каждом из них была определенная, присущая только данному опыту скорость или расход рыбы и воды, а также температура.

Обработка опытного материала

Физические явления, происходящие в то время, когда по трубам протекают неоднородные среды, сложны, поэтому трудно получить точное математическое выражение закономерностей этого процесса. Эти трудности усугубляются еще тем, что кроме опытов, во время которых была использована труба $d = 103$ мм, нам не удалось достигнуть ни одного

режима движения смеси в экспериментальной трубе, при котором был бы постоянным расход хотя бы одного компонента, например, воды для ряда последовательных опытов, а количество другого компонента смеси, например, рыбы, могло бы изменяться в каких-либо пределах. Поэтому результаты наших опытов со смесью воды и рыбы, как уже было отмечено, представляют множество экспериментальных точек, каждая из которых показывает определенное значение гидравлических и геометрических параметров потока водорыбной смеси.

Однако, несмотря на это, нам удалось путем соответствующей обработки результатов опытов установить относительно точную зависимость потери напора от концентрации рыбы, находящейся в составе движущейся в трубе смеси, и от скорости движения смеси.

Анализируя существующие методы обработки опытных материалов о движении в трубах неоднородных сред, можем констатировать два направления в этом вопросе.

Одни авторы, изучая явления, происходящие при движении неоднородной среды, прежде всего стремились результаты своих наблюдений дать в такой форме, которая изображала бы в основном физическую сущность процесса, и получали при этом сложную математическую зависимость. Результаты наблюдений других хотя и сравнительно легко применимы для решения технических задач той или иной отрасли промышленности, но базируются на грубых допущениях, далеко не отвечающих физическим законам движения неоднородной среды.

При обработке опытного материала мы старались представить математические зависимости в сравнительно простой форме, легко доступной для широкого круга технических работников, а также ставили задачу — не допускать больших отклонений от экспериментальных точек. Как нам кажется, мы это достигли благодаря большому количеству опытного материала (107 точек по рыбе и 62 по воде при относительно небольшом их разбросе, не превышающем для основных расчетных формул в среднем $\pm 7\%$).

Исследуя ряд возможных вариантов обработки опытного материала, мы, в конечном счете, решили, что наиболее целесообразно обрабатывать этот материал так, чтобы в результате можно было бы удельную потерю давления $\frac{dp}{dx}$ определять в зависимости от концентрации рыбы (c) и воды, находящейся в составе этой смеси.

Одновременно с получением аналитического выражения удельной общей потери давления при движении смеси воды и рыбы в напорных трубах также необходимо выяснить вопрос — возникает ли явление аномалии при движении смеси воды и рыбы в трубопроводах; это явление констатировали некоторые исследователи у многих неоднородных смесей. Поэтому и была произведена обработка всех наших опытов, чтобы получить ответ на все эти и другие вопросы.

Естественно предположить, что величина потери давления при движении в трубах всякой несжимаемой смеси может зависеть, во-первых, от самой природы компонентов этой смеси и, прежде всего, от их вязкости и от относительной скорости их, когда наблюдается так называемое явление «проскальзывания»; во-вторых, от скорости перемещения неоднородной жидкости и состояния поверхности трубы, в которой совершается это движение. Основываясь на этих соображениях, а также на данных проф. Миловича¹ о том, что число Рейнольдса дает нам меру работы или поглощения энергии жидкой среды ее вихревым движением и что несущей и соприкасающейся со стенкой средой является, как правило, жидкость, мы при обработке материала сочли лучшим вариантом принять за основу расчета критерий Рейнольдса, вычисленный по воде.

¹ Проф. Милович, Основы динамики жидкостей, Энергоиздат, 1938.

Кроме того, при обработке материалов мы допустили, что:

1) смесь воды и рыбы во время движения смачивает стенки трубы и пограничный слой жидкости у стенки трубы не нарушается;

2) вязкость водорыбной смеси равна вязкости воды при одной и той же температуре;

3) рыба и вода движутся в трубе с одинаковыми скоростями, что, как показали наши визуальные наблюдения за движением хамсы, справедливо только при скоростях больше 1 м/сек.

Произведенная предварительная обработка результатов опытов показала, что для различных координат в одних и тех же опытах точки разбросаны далеко не одинаково. Оказалось, что точки меньше всего разбросаны при изображении их в безразмерных координатах

$$\left(c_1 \frac{dp'}{dp} \right) \text{ и } (Re c_1 \lambda),$$

где: $\frac{dp'}{dp}$ — отношение удельной потери давления $\left(\frac{dp'}{dx} \right)$, вызываемой движением смеси воды и рыбы, к удельной потере давления $\left(\frac{dp}{dx} \right)$, обусловленной движением чистой воды, находящейся в составе движущейся в трубе смеси;

$$c = \frac{Q_v + Q_p}{Q_v} \text{ — концентрации рыбы;}$$

Q_v и Q_p — расходы воды и рыбы;

λ — коэффициент трения смеси воды и рыбы, вычисляемый по формуле Дарси—Вейсбаха;

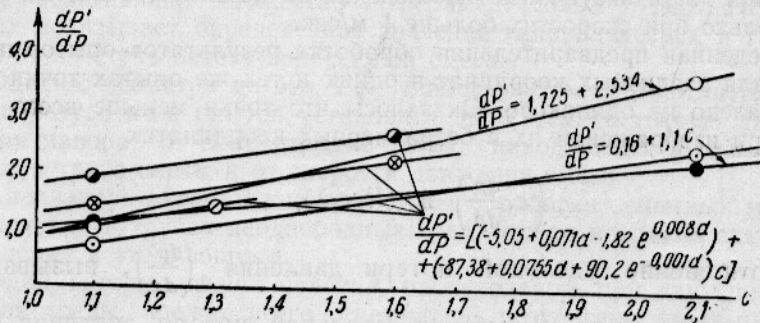
Re — критерий Рейнольдса, вычисляемый по воде.

Очевидно, эта сравнительно небольшая разбросанность точек объясняется тем, что при таких координатах сглаживаются влияния вязкости воды, обусловленные колебаниями температуры и колебаниями в расходах воды, которые возникали, как уже было сказано, между отдельными измерениями. Следовательно, безразмерные координаты дают минимальную разбросанность точек, вызванную в основном субъективными и другими ошибками при отсчете измерений.

Кроме того, если безразмерные координаты $\left(c_1 \frac{dp'}{dp} \right)$ будут в основе обработки опытного материала, то это даст нам возможность не только вывести более точную формулу для расчета потерь давления или потерь напора при движении смеси воды и рыбы в трубах с шероховатостью, которая была во время наших опытов (табл. 1), но и рассчитать аналогичное сопротивление в трубах с любой другой шероховатостью. Для такого переноса результатов исследования, полученных в виде формул (рис. 13), есть физические основания. Действительно, величина измеренного во время опытов сопротивления $\left(\frac{dp'}{dx} \right)$ при остальных равных условиях зависит только от шероховатости внутренних стенок трубы. Вычисленная нами величина сопротивления для воды $\left(\frac{dp}{dx} \right)$, находившейся в составе движущейся смеси, зависит в такой же степени, как и смесь только от шероховатости этой же самой трубы. Мы можем, таким образом, допустить, что с увеличением или уменьшением шероховатости в трубе будет соответственно увеличиваться или уменьшаться в одинаковой степени сопротивление смеси и сопротивление воды, которая входит в эту смесь. Поэтому отношение удельной потери давления $\frac{dp'}{dx}$, вызванной движением смеси, к удельной потере давления $\frac{dp}{dx}$, обусловленной во-

дой, находящейся в составе этой смеси, для одной трубы с определенной шероховатостью будет таким же и для другой трубы, имеющей отличную от первой трубы шероховатость.

Предположение о существовании постоянных отношений $\frac{dP'}{dP}$ в трубах с различной шероховатостью нам представляется вполне закономерным

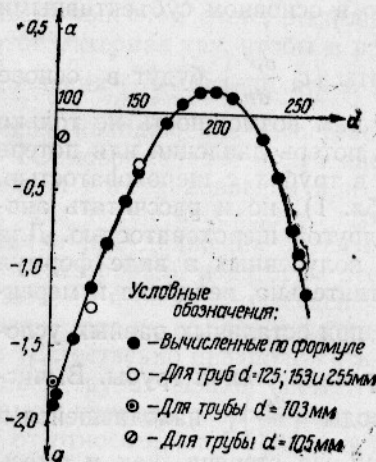


Условные обозначения:

- Труба $d = 103$ мм с камсой
- " $d = 105$ мм с талькой
- " $d = 125$ мм с камсой
- ⊗ Труба $d = 153$ мм с камсой
- " $d = 200$ мм теор.
- ⊗ " $d = 255$ мм с лещом и судаком

Рис. 13. Графическое выражение формул для расчета потерь давления при движении смеси воды и рыбы в напорных трубопроводах диаметром от 100 до 260 мм.

лишь в том случае, если однородная жидкость движется с различными скоростями. Для движущейся же в трубе смеси воды и рыбы эта закономерность возможно будет несколько иной, чем для чистой воды. Это отличие, повидимому, будет тем больше, чем выше концентрация рыбы



- Условные обозначения:
- - Вычисленные по формуле
 - - Для труб $d = 125, 153$ и 255 мм
 - ⊗ - Для трубы $d = 103$ мм
 - - Для трубы $d = 105$ мм

Рис. 14. Зависимость a от диаметра трубы.



- Условные обозначения:
- - Точки, вычисленные по формуле
 - - Точки опытные для труб $d = 125, 153, 255$ мм

Рис. 15. Зависимость b от диаметра трубы.

в смеси и чем больше шероховатость трубы. Однако, нам кажется, что до уточнения этого вопроса не произойдет большой ошибки при определении потерь напора, если мы будем считать отношения $\frac{dP'}{dP}$ при движении смеси и воды в трубах с различной шероховатостью постоянными.

Пользуясь теорией приближенного вычисления, нам удалось не только найти общий вид формул зависимости $\frac{dp'}{dp}$ от c , но и вычислить значения их параметров как для каждой из формулы пяти опытных труб табл. 5, так и для общей формулы (10) расчета сопротивлений при движении смеси в трубах $d =$ от 120 до 255 мм (рис. 13). Общая формула (10) получена на основании частных формул вида:

$$\frac{dp'}{dp} = a + bc, \quad (6)$$

выведенных для труб $d = 125, 153$ и 255 мм следующим образом.

На оси ординат откладывали значения параметров a и b из частных формул 1—5 (табл. 5), а по оси ординат — соответствующие им значения диаметров труб. В результате были получены графики, изображенные на рис. 14 и 15. Получив эти графики, нетрудно аппроксимировать их уравнениями общего вида:

$$Y = A + B + Ke^{nd}.$$

Таблица 5

Значение параметров a и b в формуле $\frac{dp'}{dp} = a + bc$ для расчета сопротивления при движении смеси воды и рыбы в напорных трубах диаметром от 100 до 260 мм

| № формул | Диаметр трубы (в мм) | Выражение параметров расчетных формул | Пределы изменения скоростей между отдельными опытами со смесью воды и рыбы | | | | | | Название рыбы и ее размер |
|----------|----------------------|---------------------------------------|--|--------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|------------------------------|
| | | | скорость смеси (в м/сек.) | | приведенная скорость воды (в м.сек.) | | расход рыбы (в м ³ /час) | | |
| | | | макси-мальная | мини-мальная | макси-мальная | мини-мальная | макси-мальная | мини-мальная | |
| 1 | 103 | $\frac{dp'}{dp} = -1,725 + 2,53 c$ | 3,40 | 1,41 | 2,82 | 0,70 | 34,40 | 3,10 | Хамса 5—8 см |
| 2 | 105 | $\frac{dp'}{dp} = -0,16 + 1,1 c$ | 2,32 | 0,46 | 2,15 | 0,41 | 14,00 | 0,99 | Тюлька 4 „ |
| 3 | 125 | $\frac{dp'}{dp} = -1,24 + 1,69 c$ | 2,10 | 0,83 | 1,93 | 0,69 | 22,20 | 3,16 | Хамса 5—8 „ |
| 4 | 153 | $\frac{dp'}{dp} = -0,317 + 1,615 c$ | 1,39 | 0,65 | 1,26 | 0,44 | 22,50 | 3,50 | Хамса 5—8 „ |
| 5 | 255 | $\frac{dp'}{dp} = -0,915 + 1,77 c$ | 3,38 | 1,14 | 3,35 | 1,10 | 28,30 | 1,16 | Лещ 19—20 „ Судак 24—45 „ |

В результате вычисления параметров формула (6) принимает следующий вид:

для члена a (рис. 16):

$$a = -5,05 + 0,071d - 1,82e^{0,008d}; \quad (7)$$

для члена b (рис. 17):

$$b = -87,38 + 0,0755d + 90,2e^{-0,001d}. \quad (8)$$

После сложения значений членов a и b и умножения b на концентрацию c получим:

$$\frac{dp'}{dp} = [(-5,05 + 0,071 d - 1,82 e^{0,008d}) + (-87,38 + 0,0755 d + 90,2 e^{-0,001d})c]. \quad (9)$$

или

$$\frac{dp'}{dx} = \frac{dp}{dx} [(-5,05 + 0,071 d - 1,82 e^{0,008d}) + (-87,38 + 0,0755 d + 90,2 e^{-0,001d})c], \quad (10)$$

где: $\frac{dp'}{dx}$ — удельная потеря давления в $кг/м^3$, вызываемая смесью воды и рыбы;

c — концентрация рыбы, которая находится в движущейся по трубе смеси (формула 11);

d — диаметр трубы в $мм$;

e — основание Неперова логарифма, равно 2,718;

$\frac{dp}{dx}$ — удельная потеря давления в $кг/м^3$, вызываемая водой, находящейся в составе смеси.

Результаты исследований

Учитывая сказанное в предыдущем разделе, мы обработали материалы 107 опытов, во время которых было исследовано движение смеси воды и рыбы в горизонтальных напорных трубопроводах.

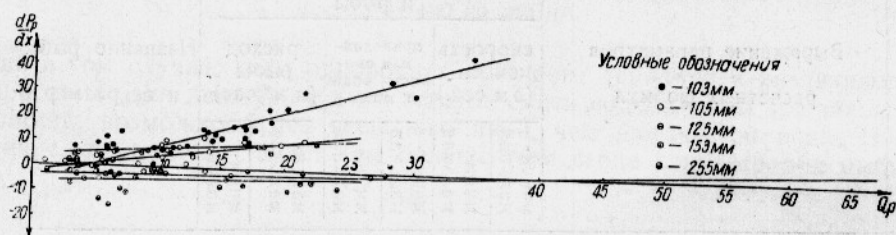


Рис. 16. Сводный график зависимости удельной потери давления в трубах от расхода рыбы.

Результаты опытов, проведенных на основе двух методик на всех трех опытных установках, показаны на рис. 16, 17, 18, 19, 20, 21 и 22.

Все эти рисунки, вычерченные в координатах $(\gamma k w v_1 \lambda)$, $(Q_p, \frac{dp_p}{dx})$ и $(c_1 \frac{dp'}{dp})$, можно разделить на три группы, каждая из которых соответствует определенной системе координат.

Таким образом, к I группе можно отнести рис. 19, 20, 21, 22 и 23, в которых по осям ординат отложены коэффициенты трения (λ) воды и смеси, а по осям абсцисс — соответствующие им произведения из $\gamma k w v$ и отдельно скорость w в $м/сек$,

где: γ — объемный вес воды в $кг/м^3$;

k — постоянная, равная $\frac{1}{2gd}$;

g — ускорение силы тяжести, равное $9,81 м/сек^2$;

d — диаметр трубы в $м$;

ν — кинематическая вязкость воды в $см^2/сек$.

Так как потерю давления, вызываемую движением воды, находящейся в составе смеси, измерить невозможно, то для ее вычисления по формуле Дарси — Вейсбаха, очевидно, надо знать величину коэффи-

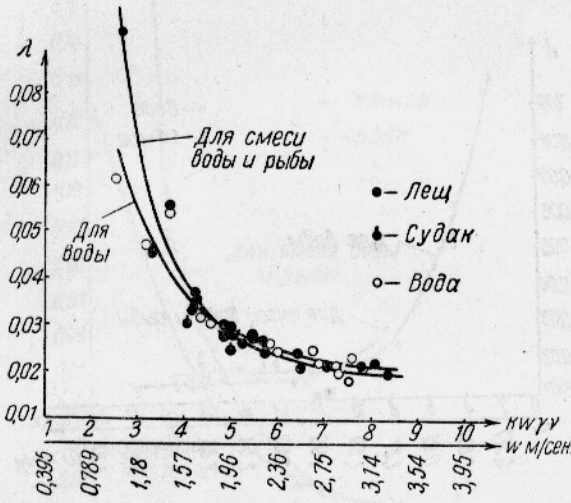


Рис. 17. Зависимость коэффициента трения движения смеси воды и рыбы в трубе $d=250$ мм от выражения $kw\gamma\gamma$.

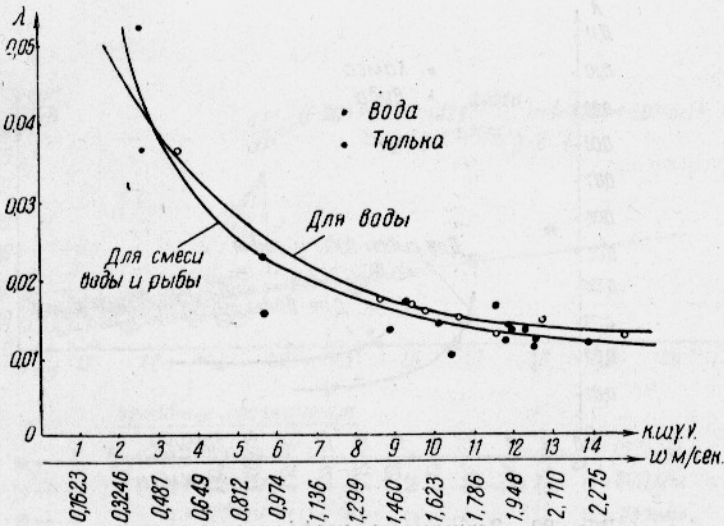


Рис. 18. Зависимость коэффициента трения движения смеси воды и рыбы в трубе $d=105$ мм от выражения $kw\gamma\gamma$.

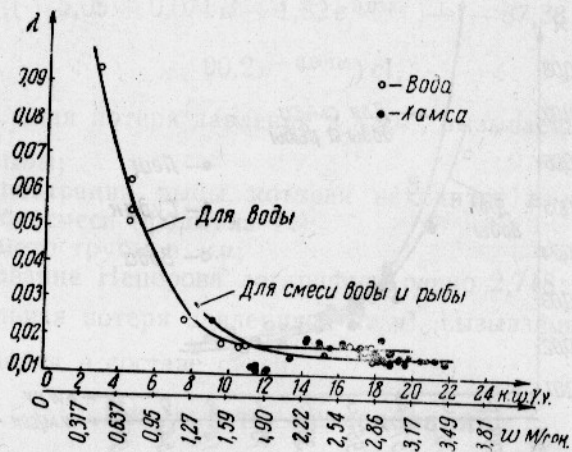


Рис. 19. Зависимость коэффициента трения движения смеси воды и рыбы в трубе $d=103$ мм от выражения $k\omega\gamma\gamma$.

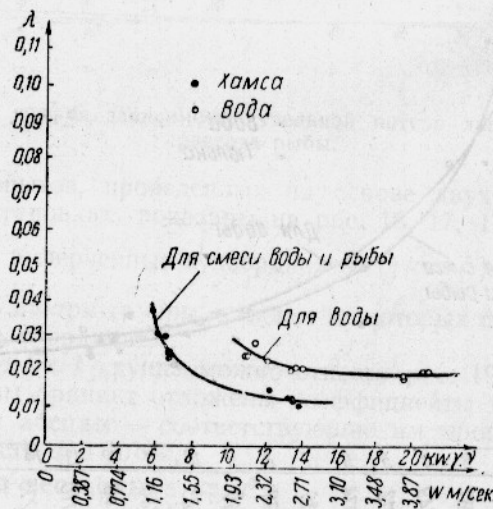


Рис. 20. Зависимость коэффициента трения движения смеси воды и рыбы в трубе $d=125$ мм от выражения $k\omega\gamma\gamma$.

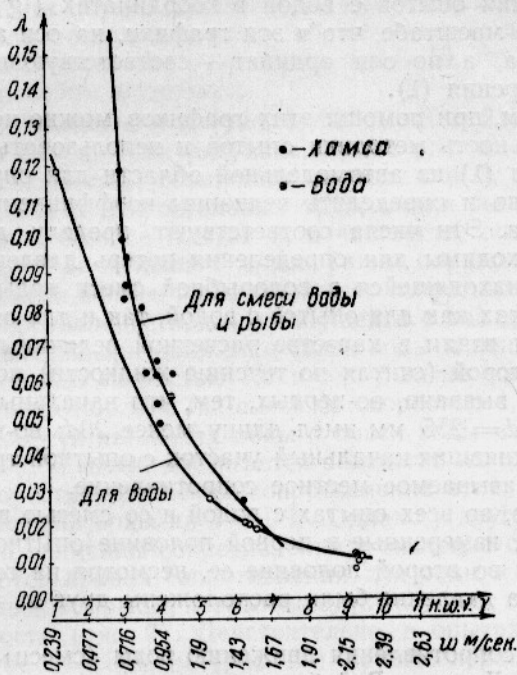


Рис. 21. Зависимость коэффициента трения движения смеси воды и рыбы в трубе $d=153$ мм от выражения $k\omega\gamma$.

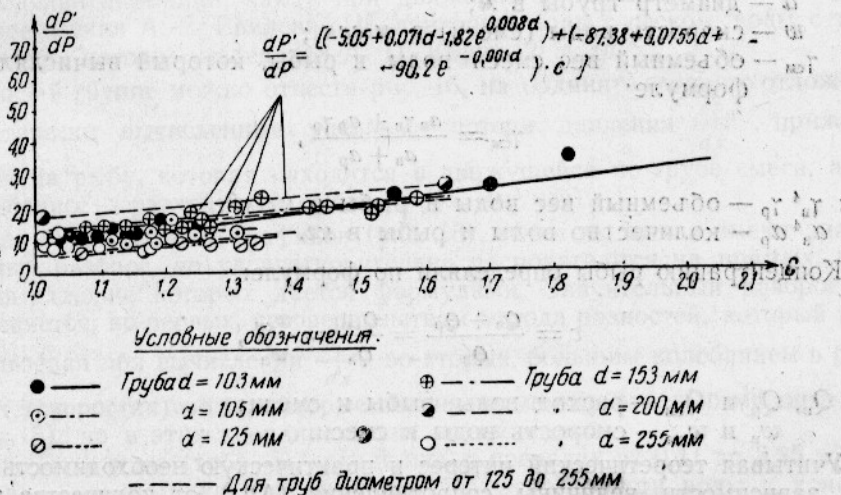


Рис. 22. Сводный график.

циента сопротивления воды, который мы определяли следующим образом: измеряли расход и температуру воды в водорыбной смеси, на основании этих данных вычисляли скорость воды и по ней определяли критерий Рейнольдса. Затем, пользуясь графиками (рис. 8—12), построенными на основании опытов с водой в координатах ($\lg Re$, $\lg \lambda$), откладывали в том же масштабе, что и эти графики, на оси абсцисс значение чисел Рейнольдса, а по оси ординат — соответствующие им значения коэффициентов трения (λ).

Таким образом, при помощи этих графиков можно не только контролировать правильность методики опытов и использовать значение коэффициентов трения (λ) из автомодельной области для определения шероховатости труб, но и определять величины коэффициентов трения для числа Рейнольдса. Эти числа соответствуют пределу действия закона Блазиуса и необходимы для определения потерь давления, обусловленных движением находящейся в водорыбной смеси воды.

Во всех расчетах как для опытов с водой, так и для опытов со смесью воды и рыбы мы взяли в качестве расчетной величины потери напора, полученные на второй (считая по течению жидкости) половине опытной трубы. Это было вызвано, во-первых, тем, что начальный участок перед опытной трубой $d = 255$ мм имел длину менее $20d$; во-вторых, тем, что во фланцах, соединявших начальный участок с опытной трубой, возникало добавочное так называемое местное сопротивление.

Действительно, во всех опытах с водой и со смесью воды и рыбы перепады давления, измеренные в первой половине опытной трубы, оказались больше, чем во второй половине ее, несмотря на то, что сверления для трубок отбора давления были расположены друг от друга на равных расстояниях.

Коэффициент сопротивления движению воды (смеси) в трубе вычисляли по формуле Дарси — Вейсбаха:

$$\lambda = \frac{\Delta P_1 2gd}{\gamma_{см} w^2},$$

где: ΔP_1 — удельная потеря давления в $кг/м^3$;

g — ускорение силы тяжести, равное $9,81$ $м/сек.^2$;

d — диаметр трубы в $м$;

w — скорость воды (смеси) в $м/сек.$;

$\gamma_{см}$ — объемный вес смеси воды и рыбы, который вычисляли по формуле:

$$\gamma_{см} = \frac{a_v \gamma_v + a_p \gamma_p}{a_v + a_p},$$

где: γ_v γ_p — объемный вес воды и рыбы в $кг/м^3$;

a_v a_p — количество воды и рыбы в $кг$.

Концентрацию рыбы определяли по формуле:

$$c = \frac{Q_v + Q_p}{Q_v} = \frac{Q_{см}}{Q_v} = \frac{w_{см}}{w_v},$$

где: Q_v , Q_p и $Q_{см}$ — расход воды, рыбы и смеси;

w_v и $w_{см}$ — скорость воды и смеси.

Учитывая теоретический интерес и практическую необходимость знания зависимости величины сопротивления (Δp_p) от количества рыбы (Q_p), находящейся в составе движущейся в трубе смеси, мы обработали материалы всех опытов с рыбой для определения этой зависимости.

Очевидно, величину потери давления, вызванную движением рыбы, находящейся в составе водорыбной смеси, как и потерю давления, обусловленную движением воды, находящейся в составе этой смеси, нельзя

измерить непосредственно. Поэтому для определения потери давления (Δp_p), обусловленной рыбой, находящейся в движущемся потоке водорыбной смеси, мы применили метод разности. Сущность этого метода состоит в том, что из потери давления, вызванной движением смеси воды с рыбой, вычитали потерю давления, обусловленную движением только воды, находящейся в составе этой смеси (рис. 16, где показан обработанный таким способом материал).

Рассматривая кривые a и b (рис. 7, 18, 19, 20 и 21), мы можем констатировать, что они на всех рисунках, кроме рис. 22 для трубы $d = 125$ мм, пересекаются. Несомненно, кривые a и b , изображенные на рис. 20, так же, как и для остальных труб, имели бы пересечение, если было бы проведено больше опытов и, в частности, опытов с водой при скоростях движения ее меньше 1 м/сек. Таким образом, при малой скорости движения смеси воды и рыбы возникает сопротивление, значительно большее, чем сопротивление воды, движущейся с той же скоростью. Например, сопротивление при движении смеси воды и леща, воды и судака в трубе $d = 255$ мм со скоростью 1,0 м/сек. больше сопротивления воды на 35%, а при движении этой же смеси со скоростью 1,5 м/сек. — только на 10%. При скорости движения воды и смеси воды и леща или судака в пределах 1,75—1,85 м/сек. достигается равенство их сопротивления, при больших же скоростях движения сопротивление этой смеси становится меньше сопротивления воды на 8—10%. Однако у других исследованных нами труб и рыб величины сопротивления и значение скоростей, при которых пересекаются кривая сопротивления для воды и кривая сопротивления для смеси воды и рыбы, несколько отличаются от только что описанной закономерности (рис. 7). Действительно, в опытах со смесью воды и тюльки в трубе $d = 105$ мм (рис. 20) кривые пересекаются при скорости движения воды и смеси 0,5 м/сек.; во время же движения смеси воды и хамсы в трубах $d = 103$ и 153 мм (рис. 19 и 20) кривые сопротивления пересекаются при скорости 1,82 и 1,70 м/сек., т. е. почти при той же скорости, что и во время движения смеси воды с лещом и судаком в трубе $d = 255$ мм.

Следовательно, при движении смеси воды и рыбы наблюдается такое же явление аномалии, как и при движении канализационных отходов, которое изучал А. З. Евилевич [1], движении воды с песком, воды с торфом и др., которое исследовал А. П. Юфин [2] и др.

Ко 2-й группе можно отнести рис. 16, на ординате которого отложены теоретически вычисленные удельные потери давления $\frac{dp_p}{dx}$, приходящиеся на рыбу, которая находится в движущейся по трубе смеси, а по оси абсцисс — расход этой рыбы (Q_p, bx мм³/час).

Как видно из этих графиков (рис. 18), точки их хотя и имеют значительный разброс, но удовлетворительно располагаются на прямых, точное выражение которых дается формулами. Значительный разброс их объясняется, во-первых, несовершенством метода разностей, который был использован при вычислении $\frac{dp_p}{dx}$; во-вторых, большим колебанием в расходах (скоростях) воды, которые возникали между отдельными опытами (табл. 5), но в этих координатах не сглаживались.

Скорости воды (табл. 5) находились в пределах от 0,41 до 3,35 м/сек. В представленном же графике (рис. 16) эти скорости воды и концентрации ее в наших опытах не учитываются. Очевидно, для одного и того же расхода рыбы, показанного на оси абсцисс, при разных скоростях движения воды мы получим различные удельные потери давления $\frac{dp_p}{dx}$, которые равны разности между удельной потерей $\frac{dp'}{dx}$, вызванной дви-

жением смеси воды и рыбы, и удельной потерей давления $\frac{dp}{dx}$, обусловленной движением воды, находящейся в смеси.

Чтобы подтвердить эту прямолинейную зависимость $\frac{dp_p}{dx}$ от расхода рыбы (Q_p), вычисленную указанным выше теоретическим способом, мы на 3-й опытной установке поставили пять серий опытов, во время которых была использована труба $d = 103$ мм. В каждой из этих серий опытов поддерживали почти постоянный расход рыбы в пределах, указанных на рис. 25. Как видно из рис. 23, графики, вычерченные в координатах $(Q_p, \frac{dp'}{dx})$, представляют собой семейство прямых, параллельных между собой линий. Несмотря на некоторое колебание расходов воды в одной и той же серии опытов, точки разбросаны сравнительно мало.

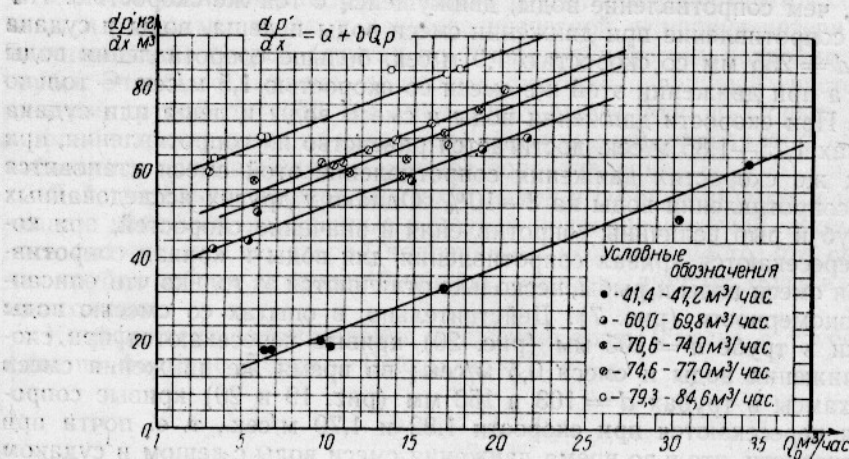


Рис. 23. График удельной потери давления в трубах $d=103$ мм.

Таким образом, результаты опытов, которые показаны на рис. 23, подтвердили правильность полученных нами теоретическим путем графиков (рис. 16), вычерченных в координатах $(Q_p, \frac{dp_p}{dx})$. Следовательно, доказано, что сопротивление во время движения смеси воды и рыбы в трубах при постоянном расходе или скорости воды, находящейся в смеси, прямо пропорционально расходу или концентрации рыбы:

$$\frac{dp'}{dp} = a + bc, \quad (6)$$

$$Y = A + B + Ke^{nd}.$$

На графиках 3-й группы (см. рис. 22) по оси ординат отложены $\frac{dp'}{dp}$, а по оси абсцисс — концентрации c .

Безразмерная величина $\frac{dp'}{dp}$ представляет собой, как уже ранее было отмечено, отношение удельной потери давления $\frac{dp'}{dx}$, вызванной движением смеси воды и рыбы, к удельной потере давления $\frac{dp}{dx}$, обусловленной движением воды, находящейся в смеси.

Концентрация c как величина безразмерная вычисляется по формуле:

$$c = \frac{Q_v + Q_p}{Q_v}, \quad (11)$$

где Q_v и Q_p — расходы воды и рыбы.

Как видно из этих графиков (рис. 22), точки разбросаны сравнительно мало, во всяком случае значительно меньше, чем на графиках (рис. 16), вычерченных в координатах

$$\left(Q_{p1} \frac{dp_p}{dx} \right).$$

Результаты опытов, изображенные на графиках (рис. 29), выражены следующими формулами:

Для трубы $d = 103$ мм:

$$\frac{dp'}{dp} = -1,725 + 2,534c; \quad (1)$$

Для трубы $d = 105$ мм:

$$\frac{dp'}{dp} = -0,16 + 1,1c; \quad (2)$$

Для трубы $d = 125$ мм:

$$\frac{dp'}{dp} = -1,24 + 1,69c; \quad (3)$$

Для трубы $d = 153$ мм:

$$\frac{dp'}{dp} = -0,317 + 1,615c; \quad (4)$$

Для трубы $d = 255$ мм:

$$\frac{dp'}{dp} = -0,915 + 1,77c. \quad (5)$$

На основании последних трех формул при помощи метода, указанного в разделе «Обработка опытного материала», была выведена формула (9), которая после преобразования имеет вид формулы (10).

Формула (10) показывает, что удельная потеря давления $\frac{dp'}{dx}$, вызываемая движением смеси воды и рыбы в горизонтальных трубах диаметром от 120 до 260 мм, равна удельной потере давления $\frac{dp}{dx}$, которая обусловлена движением воды в смеси, умноженной на многочлен:

$$\begin{aligned} & [(-5,05 + 0,071d - 1,82e^{0,008d}) + \\ & + (-87,38 + 0,0755d + 90,2e^{-0,001d}) c]. \end{aligned}$$

В этот многочлен входят в качестве независимых переменных диаметр трубы (d) и концентрация рыбы (c).

Очевидно, первые три члена представляют собой не что иное, как a , а вторые три члена — множитель b в формуле (6).

По формуле (9) были вычислены значения $\frac{dp'}{dp}$ для труб $d = 125, 153, 200$ и 255 мм и для концентраций рыбы, близких к концентрациям в наших опытах (табл. 3). Результаты этих вычислений показаны в табл. 6 на графиках (рис. 13 и 22).

Значение $\frac{dp'}{dp}$, вычисленное по формуле (9) в зависимости от диаметров труб и различных концентраций (c) рыбы

| Диаметр труб | Значение c | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1,01 | 1,10 | 1,20 | 1,30 | 1,40 | 1,50 | 1,60 | 1,70 | 1,90 | 2,10 |
| 125 | 0,54 | 0,68 | 0,85 | 1,02 | 1,18 | 1,35 | — | 1,68 | 2,01 | 2,34 |
| 153 | 1,22 | 1,36 | 1,52 | 1,67 | 1,84 | — | 2,15 | — | — | — |
| 200 | 1,71 | 1,85 | 2,00 | 2,16 | 2,31 | — | 2,63 | — | — | — |
| 255 | 0,84 | 1,00 | 1,18 | 1,36 | — | — | — | — | — | — |

В виду того что формулы (9, 10) неприменимы для труб d менее 120 мм, то на графиках зависимости $\frac{dp'}{dp}$ от c для труб $d = 103$ и 105 мм вычисляли соответственно по формулам 1 и 2.

Как видно из сравнительного графика (рис. 22), расхождение между результатами, вычисленными по универсальной формуле (9) и по частным формулам (1—5), для труб $d = 125$ и 153 мм весьма небольшое, а для трубы $d = 255$ мм эти результаты одинаковы.

При анализе результатов сводного графика (рис. 22) нетрудно заметить, что:

1) в пределах концентрации c от 1,05 до 1,20 при движении смеси хамсы и воды в трубе $d = 103$ мм и тюльки с водой в трубе $d = 105$ мм, а также смеси воды и леща или воды и судака в трубе $d = 255$ мм сопротивление в этих трубах практически одинаково.

Во время движения в этих трубах смеси воды и тюльки и воды и хамсы при концентрации меньше 1,05 или больше 1,20 сопротивление в одной трубе отличается от сопротивления в другой. Если концентрация их меньше 1,05, то и сопротивление смеси воды и хамсы несколько меньше, чем при движении тюльки; при концентрации их больше 1,20 сопротивление смеси воды и хамсы становится больше;

2) при движении смеси хамсы и воды в трубах $d = 125, 153$ и 200 мм (остальные условия одинаковы) сопротивление возрастает с увеличением диаметра трубы. Однако это закономерно лишь для труб диаметром более 125 мм и в которых движется смесь хамсы и воды. В трубах с меньшим диаметром сопротивление также возрастает и становится больше, чем в трубе $d = 125$ мм;

3) при движении смеси воды и леща, воды и судака в трубе $d = 255$ мм сопротивление практически равно сопротивлению смеси воды и хамсы в трубе $d = 103$ мм. Это, повидимому, можно объяснить тем, что смесь воды и леща, воды и судака по своей природе дает меньшее сопротивление, чем смесь воды с хамсой и воды с тюлькой. Следовательно, физические свойства хамсы и тюльки при движении их в трубах почти одинаковы.

То обстоятельство, что изменение $\frac{dp'}{dp}$ в зависимости от концентрации (c) происходит по закону прямой линии, мы объясняем особым характером движения смеси воды и рыбы. Визуальные наблюдения через плексигласовые патрубки, установленные на опытных трубах $d = 103$ и 153 мм, показали, что:

1) при движении смеси воды и хамсы со скоростью меньше 1 м/сек. хамса находится в нижней части горизонтальной трубы;

2) при движении смеси воды и хамсы со скоростью 1,0—1,2 м/сек. рыба двигалась почти равномерно по всему сечению трубы.

Однако в верхней части трубы концентрация ее была несколько меньше, чем в нижней;

3) при движении этой же смеси в трубе со скоростью более 1,2 м/сек. рыба распределялась по всему поперечному сечению потока достаточно равномерно. Она двигалась прямыми полосками (ленточками), почти параллельными оси трубы.

Такой характер движения рыбы в воде, очевидно, значительно ограничивает водяные вихри, образующиеся у стенки трубы, так как вода, находящаяся между движущимися полосками (лентами) рыбы, имеет малые пути перемещения по радиусу, а потому движение ее является ламинаризованным, при котором, как известно, сопротивление выражается через скорость законом прямой линии.

Однако такое ламинаризованное движение воды между слоями (полосками) рыбы не исключает вращательного движения потока в целом вокруг оси трубы.

Рассматривая частные расчетные (1—5) и общую формулу (9), мы должны иметь в виду, что они не удовлетворяют граничному условию, т. е. при движении одной воды ($c = 1$) отношение удельных потерь напора $\frac{dp'}{dp}$ не равно 1.

Повидимому, при малых концентрациях рыбы, находящейся в перекачиваемой смеси, сопротивление, обусловленное движением этой смеси, не подчиняется закону прямой линии, иначе при $c = 1$ прямые выходили бы из одной точки, расположенной на ординате на расстоянии, равном 1 от начала координат.

На основании нашего экспериментального материала невозможно установить характер зависимости сопротивления водорыбной смеси, движущейся в трубопроводах при малых концентрациях, так как с этими концентрациями было поставлено недостаточное количество опытов, а с концентрациями (c) меньше 1,04 совсем не было опытов. Однако, несмотря на это, предложенными формулами вполне можно пользоваться для расчетов гидравлических потерь напора в пределах концентрации (c) от 1,04 до 2,0.

Чтобы облегчить пользование универсальной формулой (10), мы вычислили ее члены:

$$a = -5,05 + 0,071d - 1,82e^{0,008d}$$

и

$$b = -87,38 + 0,0755d + 90,2e^{-0,001d}$$

для определенных диаметров труб (табл. 7).

Таблица 7

| В мм | a | bc | В мм | a | bc |
|------|-------|-----------|------|-------|-----------|
| 120 | -1,28 | +1,68 c | 149 | -0,47 | +1,58 c |
| 121 | -1,25 | +1,67 c | 150 | -0,44 | +1,58 c |
| 122 | -1,22 | +1,67 c | 151 | -0,42 | +1,58 c |
| 123 | -1,19 | +1,67 c | 152 | -0,40 | +1,58 c |
| 124 | -1,16 | +1,66 c | 153 | -0,37 | +1,58 c |
| 125 | -1,12 | +1,66 c | 154 | -0,35 | +1,57 c |
| 126 | -1,09 | +1,65 c | 155 | -0,33 | +1,57 c |
| 127 | -1,05 | +1,64 c | 156 | -0,31 | +1,56 c |
| 128 | -1,02 | +1,64 c | 157 | -0,29 | +1,56 c |
| 129 | -1,00 | +1,64 c | 158 | -0,27 | +1,56 c |
| 130 | -0,97 | +1,64 c | 159 | -0,26 | +1,56 c |
| 148 | -0,49 | +1,58 c | 160 | -0,24 | +1,56 c |

| (В мм) | <i>a</i> | <i>bc</i> | (В мм) | <i>a</i> | <i>bc</i> |
|--------|----------|----------------|--------|----------|----------------|
| 196 | +0,14 | +1,56 <i>c</i> | 209 | +0,10 | +1,58 <i>c</i> |
| 197 | +0,14 | +1,56 <i>c</i> | 210 | +0,09 | +1,59 <i>c</i> |
| 198 | +0,14 | +1,56 <i>c</i> | 250 | -0,75 | +1,75 <i>c</i> |
| 199 | +0,14 | +1,56 <i>c</i> | 251 | -0,80 | +1,75 <i>c</i> |
| 200 | +0,13 | +1,56 <i>c</i> | 252 | -0,83 | +1,76 <i>c</i> |
| 201 | +0,13 | +1,57 <i>c</i> | 253 | -0,86 | +1,76 <i>c</i> |
| 202 | +0,13 | +1,57 <i>c</i> | 254 | -0,91 | +1,77 <i>c</i> |
| 203 | +0,13 | +1,57 <i>c</i> | 255 | -0,94 | +1,77 <i>c</i> |
| 204 | +0,12 | +1,57 <i>c</i> | 256 | -0,98 | +1,77 <i>c</i> |
| 205 | +0,12 | +1,58 <i>c</i> | 257 | -1,02 | +1,78 <i>c</i> |
| 206 | +0,12 | +1,58 <i>c</i> | 258 | -1,07 | +1,78 <i>c</i> |
| 207 | +0,12 | +1,58 <i>c</i> | 259 | -1,11 | +1,70 <i>c</i> |
| 208 | +0,11 | +1,58 <i>c</i> | 260 | -1,15 | +1,80 <i>c</i> |

При помощи табл. 7 и формулы

$$\frac{dp'}{dx} = a + bc \quad (12)$$

легко вычислить сопротивление при движении смеси воды и хамсы в стальных трубах $d = 120-160$ мм и воды с судаком или лещом в трубах $d = 196-260$ мм.

Например, для стальной или чугунной трубы $d = 125$ мм, a равно $-1,12$, $b = +1,66$. Предположим, что на 1 часть хамсы приходится 3 части воды; в этом случае при производительности рыбонасоса РБ-100 в $60 \text{ м}^3/\text{час}$

$$c = \frac{Q_b + Q_p}{Q_b} = \frac{45 + 15}{45} = 1,33.$$

Если подставим в формулу (12) значения a , b и концентрации c , то получим, что:

$$\begin{aligned} \frac{dp'}{dx} &= \frac{dp}{dx} (a + bc) = \\ &= \frac{dp}{dx} (-1,12 + 1,66 \cdot 1,33) = \frac{dp}{dx} \cdot 1,088. \end{aligned}$$

Это значит, что удельная потеря давления, т. е. потеря давления на один погонный метр $\left(\frac{dp'}{dx}\right)$, вызываемая движением смеси воды и хамсы в трубе $d = 125$ мм при соотношении хамсы к воде 1 : 3 ($c = 1,33$), равна удельной потере давления $\frac{dp}{dx}$, обусловленной движением воды, находящейся в этой смеси ($45 \text{ м}^3/\text{час}$), и умноженной на коэффициент 1,088. Разумеется, этот коэффициент не является постоянной величиной; он представляет собой функцию концентрации рыбы, скорости и диаметра того трубопровода, по которому транспортируется смесь [табл. 7 и формула (9)]. Теперь следует вычислить потерю напора $\frac{dp}{dx}$ по формуле Дарси — Вейсбаха:

$$\frac{dp}{dx} = \lambda \frac{\gamma w^2}{2gd},$$

но при этом надо исходить из часового расхода воды в $45 \text{ м}^3/\text{час}$, а не в $60 \text{ м}^3/\text{час}$.

Если же удельный вес смеси незначительно отличается от удельного веса воды, то потери напора можно вычислить по любой другой формуле.

При вычислении $\frac{dp}{dx}$ по формуле Маннинга и др. размерность значения $\frac{dp'}{dx}$ в формуле (10) будет не в $\text{кг}/\text{м}^3$, а в м водяного столба на 1 м длины трубы.

Выводы

I. Разработана новая методика для измерения сопротивления в горизонтальных напорных трубах при движении в них смеси воды и рыбы.

Данная методика дала возможность определить это сопротивление в условиях работы рыбных промыслов с относительно большой точностью в широком диапазоне значений концентрации воды и рыбы. Во время опытов приведенная скорость воды менялась от 0,41 до 3,35 м/сек., скорость смеси — от 0,46 до 3,4 м/сек.; концентрация, которая выражена через объемное соотношение рыбы к воде, была при этом минимум 0,04 : 1 и максимум 1,02 : 1.

II. Разработана новая методика обработки внутренних стенок труб, так как относительная шероховатость их должна быть одинаковой. В результате этого коэффициенты шероховатости в пяти различных опытных трубах были почти одинаковыми, что дало возможность установить зависимость величины сопротивления, вызываемого движением смеси воды и рыбы, от диаметра трубы.

III. Обработаны материалы 107 опытов по определению сопротивления смеси воды и различных видов рыб (судака, леща, тюльки и хамсы) при движении их в трубах $d = 103, 125, 153$ и 255 мм, а также материалы сравнительных опытов с водой.

IV. Проведены визуальные наблюдения за картиной движения смеси воды и хамсы в трубах $d = 103$ и 153 мм.

При этом показано, что при движении ее со скоростью меньше 1 м/сек. хамса находится в нижней части трубы, а при скорости, большей 1 м/сек., она равномерно распределяется по всему поперечному сечению трубы.

V. В результате исследования установлено, что при изотермическом движении смеси воды и различных пород промысловых рыб Азово-Черноморского бассейна в горизонтально расположенных трубах $d = 103—255$ мм:

1) явление аномалии при движении в трубопроводах канализационных масс различных водопесчаных смесей возникает и во время движения смеси воды и леща, воды и судака, воды и тюльки, воды и хамсы;

2) утверждение О'Бриена и некоторых других авторов о том, что потери напора при движении гидросмеси можно определять по обычным формулам гидравлики, умножая результат, т. е. вычисленные таким образом потери на расходный удельный вес гидросмеси, для движения в трубах водорыбной смеси, состоящей из воды и судака, воды и леща, воды и тюльки и воды с хамсой, не подтверждается. Если бы указанное выше утверждение О'Бриена, Чернигина и др. при движении исследованных нами водорыбных смесей подтвердилось, то сопротивление этих смесей и воды при одинаковых созданных нами условиях движения должны были быть равными или почти равными, так как удельный вес исследованных нами рыб, по существу, равен удельному весу воды;

3) сопротивление смеси воды и рыбы в горизонтальных напорных трубах при постоянной приведенной скорости воды прямо пропорцио-

нально количеству или концентрации рыбы в этой смеси. Сопротивление незначительно увеличивается в зависимости от концентрации рыбы. Прямые, характеризующие этот рост сопротивления, имеют небольшой угол подъема;

4) установлена зависимость безразмерной величины $\frac{dp'}{dp}$ от концентрации (c) рыбы в смеси воды и различных пород рыб, которая движется по трубам $d = 103, 105, 125, 153$ и 225 мм. Эта безразмерная величина $\frac{dp'}{dp}$, выражающая отношение удельной потери давления $\frac{dp'}{dx}$, вызванной движением смеси воды и рыбы, к удельной потере давления $\frac{dp}{dx}$, обусловленной движением воды, находится в прямой зависимости от концентрации (c) рыбы, определяющей отношение расхода или скорости смеси к расходу или скорости воды в смеси.

VI. Выведены формулы и вычислены значения их параметров для определения потерь давления (напора) при движении смеси воды и рыбы в горизонтально расположенных трубах различных диаметров. Эти формулы имеют следующий вид:

1. В трубах $d = 103$ мм при движении в них хамсы и воды:

$$\frac{dp'}{dx} = (-1,725 + 2,534c) \frac{dp}{dx}.$$

2. В трубах $d = 105$ мм при движении в них тюльки и воды:

$$\frac{dp'}{dx} = (-0,16 + 1,1c) \frac{dp}{dx}.$$

3. В трубах $d = 125$ мм при движении в них хамсы и воды:

$$\frac{dp'}{dx} = (-1,24 + 1,69c) \frac{dp}{dx}.$$

4. В трубах $d = 153$ мм при движении в них хамсы и воды:

$$\frac{dp'}{dx} = (-0,317 + 1,615c) \frac{dp}{dx}.$$

5. В трубах $d = 255$ мм при движении в них судака и воды:

$$\frac{dp'}{dx} = (-0,915 + 1,77c) \frac{dp}{dx}.$$

VII. На основании частных формул для расчета сопротивлений движению смеси воды и рыбы в трубах $d = 125, 153$ и 255 мм выведена одна общая формула (10):

$$\frac{dp'}{dx} = \frac{dp}{dx} [(-5,05 + 0,071d - 1,82e^{0,008d}) + (-87,38 + 0,0755d + 90,2e^{-0,001d})c]$$

Эта формула достаточно точна для труб $d = 120-160$ мм при движении в них смеси хамсы с водой и для труб $d = 250-260$ мм при движении в них смеси воды и судака, воды и леща. Однако использование этой формулы для расчета сопротивления при движении смеси воды и

хамсы в трубах $d = 160—260$ мм или смеси воды и судака, воды и леща в трубах $d = 160—250$ мм не гарантирует достаточную точность, так как в этом диапазоне диаметров труб она является по рыбе экстраполяционной, а по диаметрам труб — интерполяционной формулой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Евилевич О. З.*, Удаление канализационных осадков по напорным трубам, Гостройиздат, 1939.

2. *Климентов А. Н.*, О потерях напора в трубах при движении гидромассы, Известия Академии Наук СССР, Отделение технических наук, 1939, № 8.

3. *Чернигин Н. Ф.*, Транспортировка рыбы по трубопроводу, журнал «Рыбное хозяйство», 1949, № 4.

4. *Юфин А. П.*, Гидротранспорт песчано-глинистых смесей по напорным трубопроводам, Материалы фонда химико-аналитической лаборатории Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, ч. I и II, 1940.