

А. Х. Халпахчян

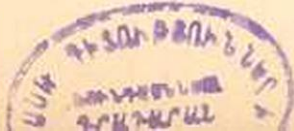
К вопросу об истечении жидкости через донные отверстия*

1. Осесимметричное радиальное истечение жидкости

Впервые задачей об истечении жидкости из отверстий начал заниматься в конце 15-го века Леонардо-да-Винчи. Значительно позже эта же задача стала предметом исследований учеников Галлилея—Кастелли (1640) и Торричелли (1644), после которых Даниил Бернулли и другие продолжали экспериментальную и теоретическую разработку задачи. Исследования перечисленных авторов преследовали цель—определить расход жидкости, скорость истечения, коэффициенты расхода и скорости, величину сжатия струи по выходе из отверстия и форму поперечного сечения струи. Эти вопросы вытекали из требований практики и имели целью уточнить формулу для скорости истечения ($v = \sqrt{2gH}$), называемую формулой Торричелли, которая позже, в 1738 г., была выведена в более общем виде Даниилом Бернулли. Многочисленными исследованиями формула Торричелли была уточнена применительно к реальным жидкостям введением в нее коэффициента ϕ , называемого коэффициентом скорости ($v = \phi \sqrt{2gH}$); этим коэффициентом учитываются интегрально различные факторы: форма отверстия, влияние насадок, положение отверстия относительно стенок сосуда и др.

Если практическая гидравлика достигла значительных успехов в уточнении расчетной формулы для истечения из отверстий и в приближении ее к опытным данным, то теоретически эта задача для тяжелой жидкости еще не имеет решения. Получение гидромеханического решения важно для установления зависимости между кинематическими элементами потока в камере и параметрами, определяющими истечение жидкости из отверстия. На существование такой зависимости указывает, например, тот факт, что при возрастании напора и размеров отверстия наблюдается снижение коэффициента расхода, а при значительном уменьшении напора возникает вихревая воронка с засосом через нее воздуха, что также приводит к резкому снижению коэффициента расхода.

* Публикуя настоящую работу, автор не может не вспомнить со скорбью память безвременно скончавшегося учителя—академика Н. Е. Кочина, который проявлял большой интерес к настоящей работе.



Существенным отличием настоящей работы от известных уже работ по истечению из отверстий является то, что нами изучаются не гидравлические характеристики истечения, а движение жидкости в самой камере, которое влияет в конечном итоге на гидравлические характеристики (скорость, расход и т. д.). Так как исследований в этом направлении в литературе не имеется и характер течения также не известен, то нами было проведено экспериментальное исследование, результаты которого приводятся ниже.

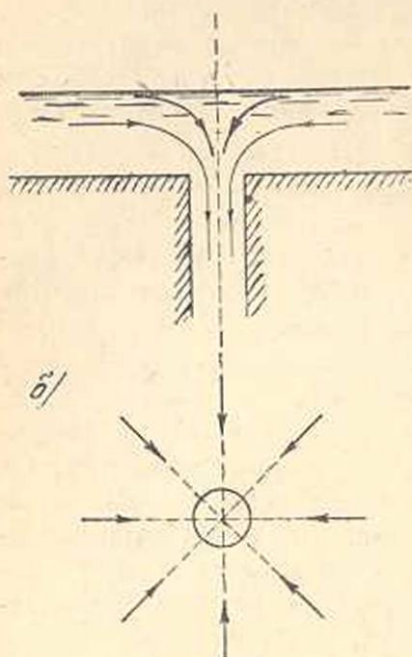
1. Экспериментальное исследование осесимметричного радиального истечения жидкости через донное отверстие

Перед экспериментом нами были поставлены следующие вопросы:

1. Как изменяется форма свободной поверхности потока в камере при изменении расхода истечения и глубины потока? 2. Какова картина течения вблизи отверстия? 3. Является ли устойчивым истечение с осевой симметрией с радиальными линиями тока? 4. Какое влияние оказывают на устойчивость течения временные возмущения

в потоке и сила Кориолиса? 5. Каков характер перехода из напорного истечения в безнапорное типа шахтного водослива? Для ответа на эти вопросы были проведены опыты на специальной экспериментальной установке, воспроизводившей модель бесконечно большого в плане сосуда с горизонтальным дном.* На дне имелось круглое отверстие, через которое жидкость вытекала в присоединенную к отверстию вертикальную трубу (фиг. 1). Система вентилей и холостой водоспуск позволяли поддерживать постоянными глубину потока в камере и расход истечения. Глубина воды в камере могла изменяться от нуля до 150 мм, а расход — от нуля до 3,0 л/сек.

Приток воды к отверстию осуществлялся точно в радиальном направлении, что удалось достичь бла-



Фиг. 1.

годаря равномерному подводу воды к периметру круга, в центре которого находилось отверстие, а также специальной системой гашения возможных вихреобразований и общей закрутки потока в камере.

* Эта же установка была использована для исследования воронкообразного истечения с водоворотами (См. гл. II).

Дно камеры было сделано из круглого диска диаметром 60 см, а диаметр отверстия мог по желанию быть трех размеров: 26,5 мм, 40 мм и 52,5 мм.

Свойство радиально сходящегося потока жидкости сохранять ламинарный режим даже при значительных скоростях течения обеспечивало возможность наблюдений формы линий тока внутри потока методом окрашивания струек, а линии тока на свободной поверхности наблюдались по перемещениям пылинок алюминиевой пудры.

Фотоснимки опытов, приведенные в работе, были сделаны также с применением алюминиевой пудры.

2. Форма свободной поверхности и ее изменения

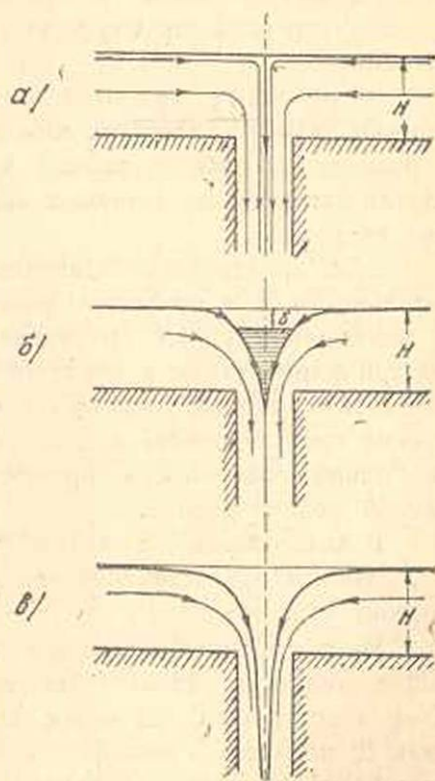
В зависимости от соотношения величин расхода и глубины потока в камере (см. фиг. 7, § 5) свободная поверхность может иметь три резко отличающихся друг от друга формы (фиг. 2).

При малых расходах истечения и соответственно малых скоростях течения в камере, свободная поверхность почти не отличается от горизонтальной плоскости (фиг. 2 а). При увеличении расхода до определенной величины над отверстием образуется чашеобразная впадина с горизонтальным дном (фиг. 2 б). Наконец, при дальнейшем увеличении расхода глубина чаши возрастет и при некотором критическом состоянии образуется уходящая вниз глубокая воздушная полость (фиг. 2 в), что сопровождается также изменением структуры потока в камере (см. сл. параграф).

Как установлено опытами, такая смена форм свободной поверхности вполне закономерна, и каждая из форм вполне устойчива.

Следует отметить, что критическое состояние потока, при котором наблюдается смена одной формы свободной поверхности другой, зависит от таких факторов, как расход, глубина потока, диаметр отверстия и поверхностное натяжение жидкости.

Увеличение поверхностного натяжения, осуществлявшееся с помощью тончайшей пленки поверхностно-активной инородной жидкости, вызывало запаздывание смены формы свободной поверх-



Фиг. 2.

ности. Например, переход от второй к третьей форме происходил при больших глубинах чаши— δ (фиг. 2 б), чем в том случае, когда поверхностное натяжение было меньше.

Опытами установлено также существенное влияние на описываемое явление диаметра отверстия, глубины потока в камере и расхода. При постоянных диаметре и расходе смена форм поверхности происходит при уменьшении глубины потока в камере. При постоянных диаметре и глубине смена форм происходит при увеличении расхода истечения. При постоянных глубине и расходе смена форм наблюдается не при всех диаметрах. При малых диаметрах отверстия явление может быть не заметным, а иногда и совершенно не будет наблюдаться (в пределе уменьшения диаметра до нуля—точечный сток). Так, наибольший эффект смены форм наблюдался в наших опытах при диаметре $d=52,5$ мм, хуже—при $d=40$ мм и значительно хуже при $d=26,5$ мм. Это объясняется совокупностью влияния трех величин—расхода истечения, глубины потока и диаметра отверстия, которые определяют скорость частиц жидкости в области потока вблизи отверстия, так как от скоростей потока зависит внутренняя структура его, о чем говорится в следующем параграфе.

В реальных гидротехнических водоприемных сооружениях обычно диаметр отверстия может достигать нескольких метров при соразмерных глубинах потока над отверстием. Вследствие этого в случае затопленных шахтных водосливов имеет место рассматриваемое явление.

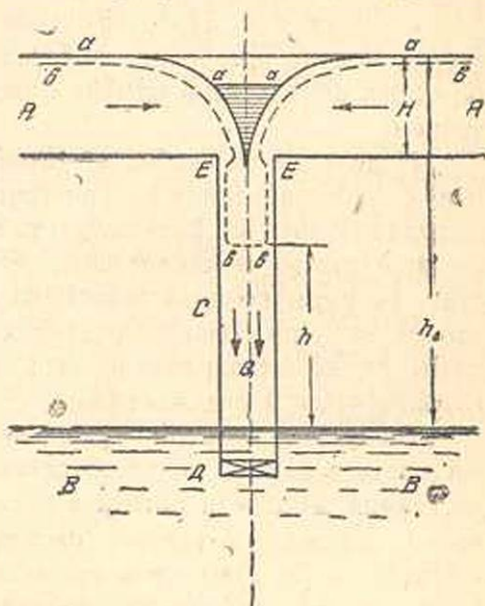
Если производить описанный выше опыт в обратной последовательности, т. е. от максимального расхода постепенно переходить к минимальному, то свободная поверхность потока приобретает все три формы также в обратной последовательности. Это указывает на закономерность, зависящую исключительно от физико-кинематических свойств потока и, как это будет ясно из дальнейшего, форма свободной поверхности органически связана со структурой физической модели потока.

В дальнейшем мы будем пользоваться терминами: „напорное“ и „безнапорное“ истечение через донное отверстие, смысл которых состоит в следующем.

На фиг. 3, изображающей принципиальную схему модели установки, жидкость вытекает из верхней камеры А—А через отверстие Е—Е и по трубе С, на конце которой имеется регулирующий вентиль Д, попадает в нижний сосуд ВВ. При этом возможны два случая: 1. когда расход истечения Q зависит от напора h_0 и определяется формулой напорного истечения $Q=\mu\omega\sqrt{2gh_0}$, где ω —площадь отверстия вентиля, а μ —коэффициент расхода, и 2. расход истечения в трубу определяется по формуле водослива и зависит от глубины потока в камере Н. Излив жидкости во втором случае происходит как в случае водослива с широким порогом круговой формы

в плане. В этом случае сплошности потока между верхней и нижней камерами нет, а в трубе С имеется разрыв потока, и уровень в ней устанавливается на некоторой высоте h от свободной поверхности жидкости в нижней камере и зависит от расхода излива из верхней камеры и от пропускной способности вентиля Д.

Первый из описанных случаев мы называем „напорным изливом“, при котором свободная поверхность потока изображена сплошной линией $a-a$ на фиг. 3, а второй случай — „безнапорным изливом“, свободная поверхность, при котором изображена на фиг. 3 штриховым пунктиром $b-b$.



Фиг. 3.

3. Физическая модель радиального осесимметричного истечения; „conoид обтекания“

Рассмотренным в предыдущем параграфе трем формам свободной поверхности потока соответствуют три модели радиального осесимметричного излива через донное отверстие. Первые две модели относятся к напорному истечению а третья — к безнапорному. Первая модель характеризуется едва уловимым понижением свободной поверхности к оси симметрии, а внутри потока сохраняется сплошность течения и плавное обтекание углов без отрыва от стенок и свободной поверхности. Вторая модель отличается от первой не только изменением свободной поверхности, на которой образуется воронка понижения с горизонтальной площадкой над отверстием, но и возникновением внутри потока поверхности разрыва формы коноида вращения, осью которого является ось симметрии течения в камере, а жидкость внутри коноида остается в покое.

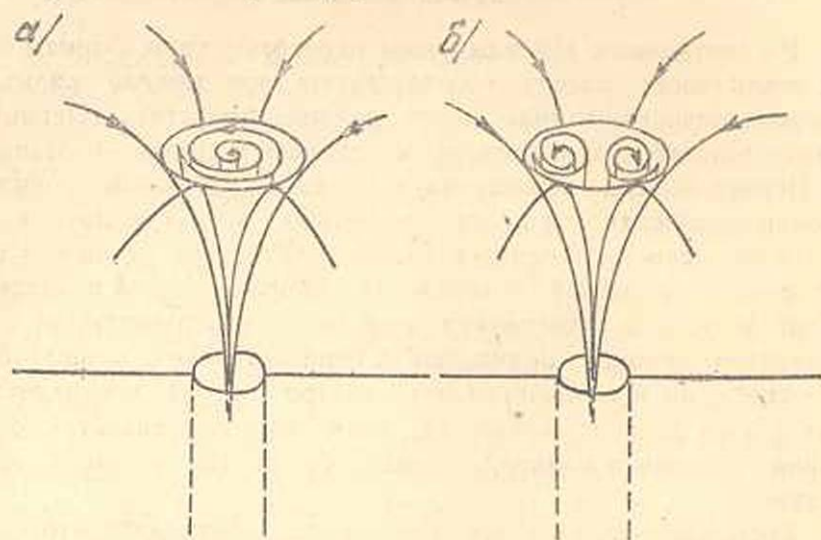
Третья модель является следствием вырождения второй. Свободная поверхность вблизи отверстия постепенно переходит в воронку, которая, прорезая всю глубину потока, уходит в отверстие.

Первая модель изображена в разрезе на фиг. 2 а. Линии тока течения плавно обтекают углы и лежат в вертикальных диаметральных плоскостях. Линия пересечения свободной поверхности с вертикальной плоскостью, а также ось симметрии и твердые стенки дна являются граничными линиями тока. Эта модель сохраняется, од-

нако, только при весьма малых скоростях течения. При увеличении скоростей, с момента образования на свободной поверхности воронки понижения, характер течения резко изменяется; образуется вторая модель истечения, которая является одним из наиболее интересных результатов опытов с радиальным осесимметричным истечением.

Появление на свободной поверхности воронки понижения связано с возникновением внутри потока поверхности разрыва (фиг. 2 б). Заштрихованная на рисунке часть является областью застойной жидкости; поток же в камере обтекает „коноид“, устремляясь в отверстие. Размеры коноида зависят от кинематических и геометрических элементов. При больших расходах дно коноида становится меньшего диаметра, но одновременно весь коноид опускается ниже, так что глубина чаши δ увеличивается.

Выпуском в поток окрашенных струек было установлено, что жидкость в самом коноиде оставалась чистой и заметного обмена частицами жидкости потока и застойной области не было. В то же время жидкость в самом коноиде не оставалась в полном покое, а находилась в медленном вращении вокруг оси симметрии. Направление вращения было неустойчивым и зависело от случайных причин. Нередко наблюдалось возникновение в коноиде одновременно двух вихрей противоположных знаков (фиг. 4). Эти опыты подтверждают неустойчивый характер равновесия жидкости в коноиде.



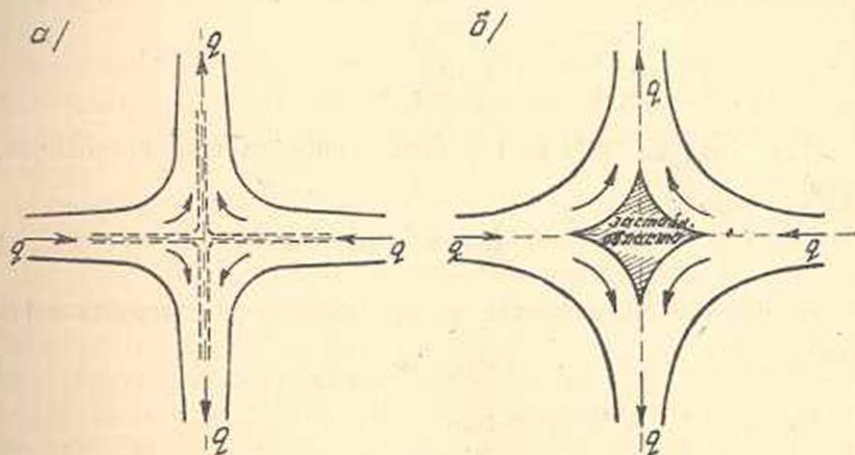
Фиг. 4.

Своеобразной особенностью второй модели осесимметричного истечения является возникновение поверхности разрыва не вблизи твердых границ потока, а у свободной поверхности. Кроме того, так как мы имеем дело с тяжелой жидкостью, то второй особенностью является способность потока поддерживать на своей поверхности

тяжелое „инородное“ тело формы коноида. Если искать аналогию этому в плоском движении жидкости, то нечто подобное наблюдается, например, при сопряжении ниспадающей с водослива струи с нижним бьефом, либо при истечении из-под щита. В случае затопленного прыжка в нижнем бьефе образуется валец, поддерживаемый струей.

В связи со сказанным выше интересно отметить, что нашим первым двум моделям пространственного потока с осевой симметрией можно привести в соответствие две возможные модели плоского течения невесомой жидкости в теории струй.

На фиг. 5 изображены две возможные формы встречи двух струй: а)—без застойной области и б.)—с застойной областью. Эти задачи имеют математическое решение для плоского течения невесомой жидкости. [1] При этом первый случай (а) может быть получен из второго предельным переходом—стягиванием застойной области в точку.



Фиг. 5.

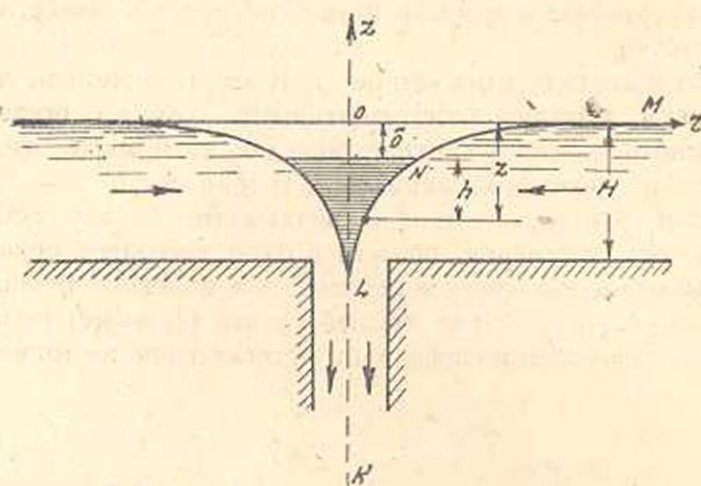
Опыты показали, что причиной образования поверхности разрыва и „коноида“ при напорном осесимметричном истечении является, помимо резкого искривления потока вблизи оси симметрии, также поверхностное натяжение, которое наряду с вязкостью жидкости вызывает торможение поверхностных слоев потока. Последнее приводит к созданию значительного градиента скоростей и поверхности разрыва коноидальной формы.

Для качественной оценки поведения „коноида“ при возрастании скоростей частиц в потоке рассмотрим уравнение полной энергии в форме Бернулли для поверхностных линий тока.

Выбрав оси цилиндрических координат, как то показано на фиг. 6, мы, пренебрегая потерями, будем иметь:

$$E = -z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{Const} \quad (1)$$

На свободной поверхности потока линия тока MN в точке N переходит на боковую поверхность „conoида“, а в точке L сопрягается с осью симметрии течения.



Фиг. 6.

Для участка MN из (1) после определения постоянной, получим:

$$\frac{v^2}{2g} - z = 0 \quad (2)$$

На участке NL давление распределяется по гидростатическому закону:

$$p = p_{\text{атм}} + \gamma h \quad (3)$$

Тогда из (1) и (3) получим:

$$\frac{v^2}{2g} = z - h \quad (4)$$

Так как $z - h = \delta$ (фиг. 6), то на участке NL

$$\frac{v^2}{2g} = \delta = \text{Const} \quad (5)$$

Откуда следует, что вдоль линии тока величина скорости постоянна, а глубина чаши δ является мерой скоростного напора.

Формула (4) показывает, что для иного установившегося состояния потока с большей величиной скорости (т. е. при пропуске через сечение большего расхода) глубина воронки δ также возрастет, а „conoид“ опустится ниже от свободной поверхности, что подтверждается опытом.

Наконец, третья модель осесимметричного истечения—безнапорного—с достаточной полнотой описана в литературе и известна как шахтный водослив.

Хорошо изученный в лабораторных условиях шахтный водослив тем не менее не имеет еще точного гидромеханического решения. Известные решения [2] имеют тот недостаток, что для упрощения кольцевая форма водослива в плане заменяется прямолинейным водосливом и, следовательно, сходящийся к центру поток заменяется плоским. Это, однако, допустимо лишь при больших диаметрах отверстия. При малых диаметрах отверстия сведение задачи к плоской становится недопустимой, а отсюда следует, что задача становится значительно труднее, ввиду невозможности использования метода конформного отображения и теории функций комплексного переменного.

4. Об устойчивости осесимметричного истечения

Исследование вопроса устойчивости радиального истечения важно не только для полного описания самого явления, но и для понимания причин вырождения данного течения в истечение с вихревой воронкой, о котором говорится во второй главе настоящей работы.

Нарушение устойчивости рассматриваемого течения жидкости вообще возможно от: 1. непрерывно действующих на поток возмущающих сил и, 2. от временных или мгновенных возмущающих импульсов.

Постоянно действующие возмущающие силы в свою очередь могут быть разделены на: а) возмущающие силы, исключить которые мы не можем; например, сила Кориолиса, учитывающая влечущее воздействие вращения земли, и б) силы, воздействие которых на поток мы можем устранить. Примером последних может быть общая закрутка потока, вызываемая плановыми очертаниями направляющих поток твердых стенок, а также наличие в самом потоке источников, непрерывно отдающих в поток вихревые импульсы (подробнее об этом говорится во второй главе).

Нашы опыты преследовали цель учесть влияние временных возмущений и силы Кориолиса на устойчивость радиального истечения.

1. Схема опытной установки позволяла иметь поток в камере с полной осевой симметрией. Таким образом, если влияние силы Кориолиса может нарушить устойчивость радиального течения, то со временем в потоке должны появляться циркуляционные скорости частиц жидкости вблизи отверстия с вращением против часовой стрелки (в нашем полушарии).

Отрегулировав установившееся течение*, когда соблюдалось постоянство расхода истечения и глубины потока в камере, нами в течение долгих часов наблюдался характер течения в камере. При

* Неустановившееся истечение само может служить источником вихреобразования.

этом оказалось, что течение с осевой симметрией не нарушалось во все время опытов. Контроль за характером течения производился окрашиванием струек жидкости на различной глубине потока и по различным радиусам камеры. Во все время опытов окрашенные и хорошо наблюдаемые струйки сохраняли прямолинейную в плане форму, оставаясь точно в диаметральной сечении потока. Это имело место при любых расходах и глубинах в камере, т. е. при всех трех моделях течения, рассмотренных выше. Эти опыты экспериментально доказывают устойчивость радиального истечения через донное отверстие и неспособность силы Кориолиса нарушить устойчивость. Количественная оценка влияния силы Кориолиса приводится во второй главе.

2. Исследование влияния временных возмущений на устойчивость радиального истечения производилось нарушением установившегося радиального истечения временной закруткой жидкости над отверстием помощью совка. При этом нарушалось радиальное истечение. Дальнейшее наблюдение за потоком показало, что возмущенное движение не усиливалось и не распространялось дальше области возмущения, а наоборот, постепенно ослабевало и после определенного промежутка времени, определяемого временем истечения через отверстие жидкости из области возмущения, восстанавливалось радиальное течение с осевой симметрией.

3. В случае модели с „коноидом“, мгновенное разрушение „коноида“ (изъятием его совком) вызывает нарушение формы течения вблизи отверстия, а в удалении от последнего течение сохраняет радиальность. Поток, притекающий к отверстию с прежней интенсивностью из невозмущенной области, вытесняет жидкость возмущенной области в отверстие и, таким образом, размеры области возмущенного потока постепенно уменьшаются вплоть до полного ее исчезновения. После этого течение приобретает вновь осевую симметрию, а над отверстием восстанавливается течение с „коноидом“.

Следует подчеркнуть, что чем больше протяженность потока, подвергшегося возмущению, тем длительнее сохраняется возмущенное течение. Если бы можно было подвергнуть возмущению весь поток, имеющий границы в бесконечности, то восстановление первоначального невозмущенного потока было бы невозможно. Этим, собственно, объясняется следующее явление. Если мы имеем цилиндрический сосуд круглого сечения, из которого жидкость вытекает через центральное донное отверстие, то сообщив мгновенный малый вращательный импульс всей массе жидкости в сосуде, мы можем убедиться на опыте, что ранее радиальное течение в сосуде начинает постепенно нарушаться; возникает движение по спиралям с образованием воронки—водоворота и этот характер течения сохраняется в дальнейшем вплоть до полного опорожнения сосуда.

Итак, опыты по исследованию устойчивости радиального истечения через донное отверстие позволяют сделать следующие общие выводы:

1. При действии на радиально-сходящийся поток жидкости только силы Кориолиса движение с осевой симметрией не нарушается и является устойчивым.

2. Если в результате приложенных возмущающих сил поток выведен из радиального течения, то таковое не восстанавливается вплоть до момента полного истечения через отверстие всей массы жидкости, выведенной из первоначального своего состояния. И только после того, когда притекающая к отверстию жидкость из невозмущенной области полностью вытеснит жидкость возмущенной области, восстанавливается устойчивое радиальное истечение, бывшее до возмущения потока.

3. Течение теряет устойчивость, если возмущению подвергнута вся область потока.

Таким образом можно сделать заключение, что устойчивость радиального симметричного истечения через донное отверстие является следствием непрерывного притекания к отверстию невозмущенного потока из „бесконечности“. Нарушенный же поток не в состоянии восстановить свое первоначальное невозмущенное радиальное течение, т. е. не обладает устойчивостью.

5. О критических состояниях потока

Переход от первой модели истечения ко второй, т. е. от плавного течения без поверхностей разрыва к истечению с „коноидом“ над отверстием, а также переход от второй модели к третьей, т. е. к безнапорному истечению, происходит скачкообразно. В момент смены моделей течения поток переходит через критическое состояние.

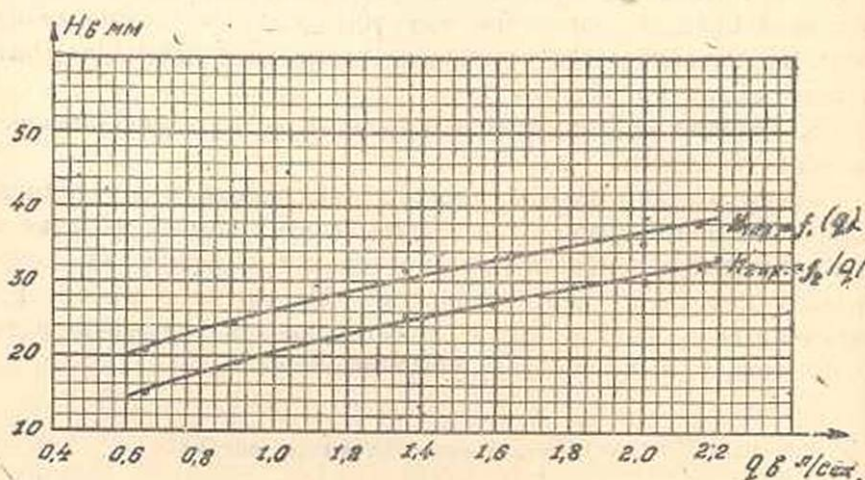
Таким образом, при увеличении расхода истечения от минимального значения до предельно возможного, при заданных размерах отверстия и напора, наблюдаются два критических состояния, при которых течение теряет устойчивость и благодаря этому происходит смена моделей истечения.

Для полного понимания природы явления число наших опытов еще недостаточно для того, чтобы можно было сделать обобщающие выводы; однако некоторые результаты представляют несомненный интерес.

В приведенном на фиг. 7 графике изображена зависимость между глубинами потока в камере $H_{1кр}$ и $H_{2кр}$ и соответствующими им расходами истечения q , полученные из опытов для обоих критических состояний потока при диаметре отверстия $d=52,5$ мм. Из фиг. 7 видно, что критические состояния потока наступают при

определенном соотношении расхода и глубины в камере. Зависимость эта выражает определенную закономерность и опытные точки располагаются на плавных кривых, приблизительно эквидистантных для первого и второго критических состояний. Графики фиг. 7 соответствуют случаю, когда критическое состояние течения определялось постепенным увеличением расхода.

В опытах с постепенным уменьшением расхода получаются, хотя и незначительно, но большие значения при тех же расходах. Это обстоятельство подлежит еще уточнению и объяснению дальнейшими опытами.



Фиг. 7.

Переход через второе критическое состояние, т. е. переход от напорного истечения в безнапорное сопровождается резким снижением расхода при заметном увеличении глубины потока в камере. Иначе говоря, глубина потока после перехода через критическое состояние становится больше критической глубины $H_{кр.}$. Это объясняется тем, что при безнапорном истечении расход определяется уже глубиной в камере и естественно должен уменьшиться. В связи с этим уменьшается также скорость течения в камере и частично восстанавливается потенциальная энергия потока за счет уменьшения скоростного напора, что и приводит к увеличению глубины потока в камере.

Во всех опытах при изучении истечения через донное отверстие наблюдается весьма значительное влияние поверхностного натяжения жидкости, что еще более рельефно проявлялось при испытании влияния поверхностно-активной пленки инородной жидкости.

II. Истечение жидкости через донное отверстие с образованием водоворота

Рассмотренное в первой главе радиальное течение жидкости с осевой симметрией не всегда может иметь место, так как на практике условие симметричного подхода потока к отверстию может не выполняться. Часто в напорных водоприемных сооружениях донного типа на свободной поверхности над отверстием возникают вихревые движения, сопровождаемые „воронками“ или, как их иначе называют, „водоворотами“.

Сущность этого явления заключается в следующем. Вследствие свойств потока и определенных причин, о которых говорится ниже, истечение через донное отверстие сопровождается появлением вблизи вертикальной оси отверстия циркуляционных скоростей, вызывающих понижение давления, достигающее наибольшего значения на оси. Под действием атмосферного давления свободная поверхность потока понижается и над отверстием образуется воронкообразная форма. Постепенно конец воронки удлиняется книзу и образуется коноидальной формы воздушная трубка, прорезающая поток на всю его глубину. Истечение жидкости в отверстие сопровождается при этом интенсивным вращением вокруг оси и засосом воздуха в отверстие через воронку. Плавающие на поверхности тела также затягиваются потоком в отверстие.

В таких гидротехнических сооружениях как шлюзы, сифонные водоспуски, аванкамеры гидроэлектростанций и др., явление водоворотов наблюдаются довольно часто. Интенсивность и размеры водоворотов могут быть опасными для сооружений [3]. Но и помимо этого, водовороты являются во многих отношениях нежелательными. Можно, например, указать на следующие последствия водоворотов:

1. Интенсивное вращение жидкости при водоворотах увеличивает потерю энергии на внутреннее трение.
2. Засасывание через воронку водоворота воздуха уменьшает пропускную способность отверстия. По данным Гибсона [4] коэффициент расхода может снизиться до $\mu=0,178$, а при отсутствии водоворота он достигает величины $\mu=0,62$.
3. Прохождение через турбинные и насосные агрегаты засасываемого через воронку воздуха заметно увеличивает кавитационные явления и снижает к. п. д. установки [5].
4. При работе сифонного водосброса засасываемый водоворотом воздух вызывает разрыв сплошности потока и выключает сифон из работы.
5. Водовороты, возникаемые при опорожнении шлюзных камер, удлиняя время шлюзования, уменьшают пропускную способность шлюза.
6. Заглатывание через водоворот твердых плавающих тел в

ного направления в правую сторону, возникали водовороты левого вращения, а при отклонении потока влево от радиального — водоворот сопровождался вращением по часовой стрелке. Таким образом, плановое очертание потока на подходе к отверстию, вызывая общую закрутку потока, создает водоворот, а сила Кориолиса сама по себе недостаточна для образования водоворота.

В этом можно убедиться также количественной оценкой порядка величины силы Кориолиса в уравнениях гидродинамики в сравнении с другими членами тех же уравнений.

Возьмем оси цилиндрических координат, связанных с вращающейся землей. Направим ось z к зениту, а ось r , нормальную z , расположим в плоскости, касательной к поверхности земли в данной точке, принятой за начало координат. Тогда уравнения движения при учете силы веса и силы Кориолиса имеют следующий вид:

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + l v_\theta,$$

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho z} \frac{\partial p}{\partial \theta} - l v_r,$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Здесь v_r , v_θ , v_z — компоненты скорости,
 g — ускорение силы веса,
 $l v_\theta$ и $-l v_r$ — компоненты силы Кориолиса,
 отнесенные к единице массы.

Величина $l = 2\omega \sin \varphi$, где $\omega = \frac{2}{86164} = 7,292 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{сек}}$ — есть угловая скорость вращения земли; φ — широта места. Так, для Москвы $\varphi = 55^\circ$ и, следовательно, $l = 2 \cdot 7,292 \cdot 10^{-5} \cdot \sin 55^\circ = 0,0001192 \frac{1}{\text{сек}}$

В первом уравнении сопоставим инерционный член $\frac{v_\theta^2}{r}$ с $l v_\theta$, а во втором — $\frac{v_r v_\theta}{r}$ с $l v_r$; легко видеть, что их отношения дают:

$$\frac{v_\theta^2}{r} : l v_\theta = \frac{v_\theta \cdot v_r}{r} : l v_r = \frac{v_\theta}{r} : l$$

Так как во время опытов измерения скорости v_θ для двух случаев дали величины: $v_\theta = 1,57 \text{ см/сек}$ при $r = 3 \text{ см}$ и $v_\theta = 0,81 \text{ см/сек}$ при $r = 4 \text{ см}$, (при начальной стадии зарождения водоворота), то получим:

$$\frac{v_\theta^2}{r} : l = \frac{1,57}{3} : 0,0001192 = 1:0,000227$$

(для первого опыта) и

$$\frac{v_{\theta}}{r} : 1 = \frac{0,81}{4} : 0,0001192 = 1 : 0,00059$$

(для второго опыта).

Таким образом влияние силы Кориолиса примерно в тысячу раз меньше, чем силы инерции в одном и том же уравнении и ею можно пренебречь.

Сама сила Кориолиса, таким образом, не может вызвать водоворота вследствие своей малости и тем, что ее влияние будет нейтрализовываться силами трения от вязкости жидкости.

Иную картину мы наблюдаем в метеорологии. Масса перемещающегося воздуха, имея большую протяженность, достигающую сотен километров, имеет также значительные скорости движения — несколько десятков метров в секунду и неудивительно поэтому, что отклоняющая сила вращения земли в этом случае может приводить и приводит к образованию мощных вихрей, как то имеет место в циклонах.

2. Причины, вызывающие водовороты

Характер зарождения и протекания явления водоворота, наблюдавшихся в наших опытах, приводят к убеждению, что водовороты возникают тогда, когда над отверстием образуется достаточной мощности вихрь, который и является основной причиной изучаемого явления. Следовательно, для объяснения зарождения водоворотов необходимо указать возможные причины возникновения мощного вихря над отверстием.

Анализ этого вопроса и последующая проверка опытом показали, что *практически* такой вихрь над отверстием может возникать в следующих случаях:

1. Если поток на подходе к отверстию подвергается постоянной закрутке в ту или иную сторону вследствие соответствующих плановых форм камеры;
2. если истечение имеет наустановившийся характер;
3. если к отверстию вместе с потоком подходят непрерывно вихри, высвобождающиеся от пограничного слоя у стенок, ограничивающих поток;
4. если на пути потока в камере имеются отдельные косостоящие пластины (дужки) или решетка из них, тогда при обтекании пластины образуется непрерывная цепочка вихрей, которые перемещаются потоком к отверстию.

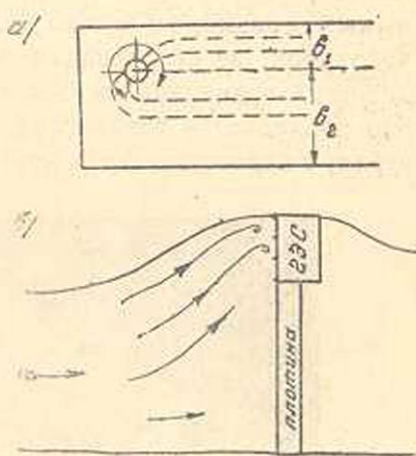
В этих случаях неизменно наблюдается зарождение устойчивых водоворотов, продолжающих существовать столь долго, пока сохраняется причина вихреобразований в камере.

1. Общая закрутка потока может происходить вследствие несимметричности подхода потока к отверстию, что почти всегда

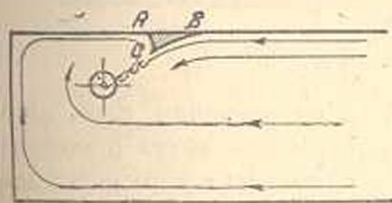
имеет место в реальных водоприемных сооружениях при ограниченных размерах камеры или при расположении сооружения вблизи берегов (фиг. 8).

Опыт с несимметрично расположенным донным отверстием в конце канала с вертикальными стенками (фиг. 9) показал, что у правой стенки образуется застойная область ABC (см. также фото фиг. 10), которая является результатом встречи струй. Вследствие разности скоростей на контакте двух струй, направляющихся к отверстию, у выступа С области ABC зарождаются вихри. Образование этих вихрей и их последующее перемещение к отверстию хорошо наблюдалось во время опытов. На оси отверстия эти вихри суммируются и по достижении интенсивности результирующего вихря достаточной величины над отверстием возникает водоворот с вращением, соответствующим знаку вихря [в описываемом случае (см. фото) вращение по часовой стрелке].

2. В настоящей статье рассматривается только установившийся поток с непрерывным притеканием жидкости к отверстию. Однако, водовороты возникают также в том случае, когда происходит опорожнение сосуда ограниченных размеров без пополнения воды в нем. Этот случай известен из лабораторных опытов, а также отмечается в литературе. Возникновение водоворота при опорожнении сосуда цилиндрической формы с центральным донным отверстием приписывается свойствам вязкой



Фиг. 8.



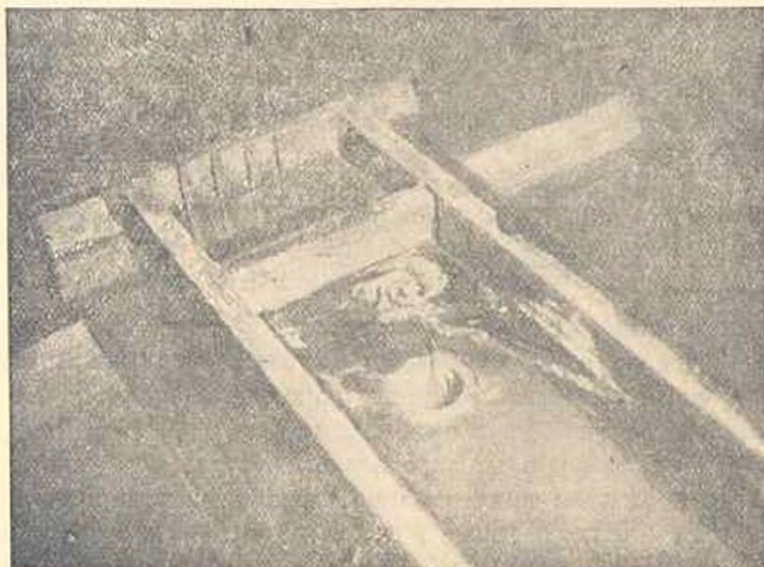
Фиг. 9.

жидкости, для которой радиальное симметричное истечение через донное отверстие является неустойчивым. Случайный внешний импульс, сообщающий вращение жидкости в сосуде, вызывает прогрессирующее возрастание интенсивности циркуляции, которая и создает водоворот. Последний по мере опорожнения сосуда постепенно усиливается и сохраняется до полного опорожнения сосуда от жидкости.

Следует заметить, что математически не доказана неустойчивость симметричного радиального истечения. Тем не менее это свойство, вероятно, присуще изучаемому явлению при органических размерах сосудов и хорошо согласуется с нашими выводами Известия I, № 2-8

об устойчивости осесимметричного истечения, изложенными в первой главе настоящей работы.

3. Если наблюдать истечение через отверстие, расположенное симметрично в глухом конце прямолинейного канала с вертикальными стенками, то можно видеть, что над отверстием появляется водоворот, не обладающий устойчивой формой. Интенсивность водоворота временами ослабевает, а иногда меняется знак вращения. Это объясняется следующим. Шероховатые боковые стенки канала, наряду с вязкостью жидкости, являются причиной зарождения вихрей.



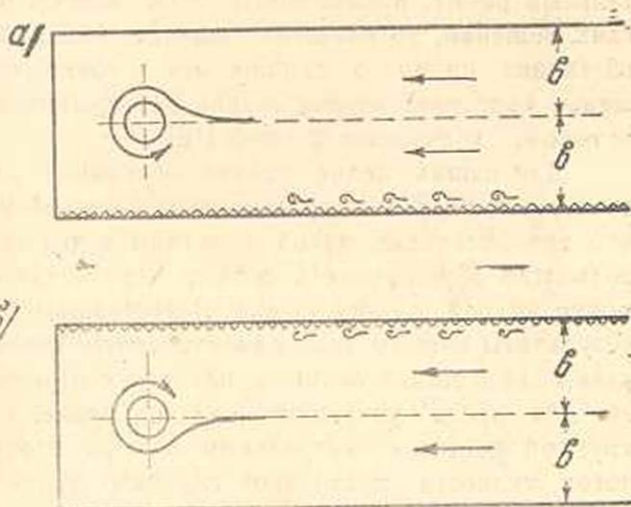
Фиг. 10.

При этом у противоположных стенок в пограничном слое зарождаются вихри разного знака; попадая в поток, эти вихри переносятся затем к отверстию. Процесс зарождения, развития и высвобождения вихрей из пограничного слоя хорошо наблюдается во время опытов. Пользуясь алюминиевой пудрой, посыпанной на поверхность потока, мы наблюдали явление, описание которого можно встретить в литературе [8]. Зарождающиеся у шероховатых стенок в пограничном слое вихри турбулентным потоком высвобождаются от стенок и поступают в поток. От противоположных стенок отрываются периодически вихри разных знаков и, попадая в поток, переносятся им к отверстию. В результате к отверстию подходят вихри разных знаков. Вследствие разной шероховатости стенок интенсивность вихрей одного знака может быть больше интенсивности вихрей обратного знака и на оси отверстия, вследствие интерференции вихрей, может возникнуть результирующий вихрь, который и создает водоворот.

Исходя из сказанного можно заключить, что если искусственно

сделать шероховатость противоположных стенок различной, то очевидно явление водоворота должно проявиться более резко. Проведенные опыты явились хорошим подтверждением этого. На фиг. 11 показана схема опытов. Одна стенка канала была сделана гладкой, покрытой эмалевой краской, а другая—с повышенной шероховатостью. При испытании мы получаем водоворот, устойчивый во времени и постоянного направления вращения.

4. Рассмотрим, наконец, случай радиально сходящегося к отверстию осесимметричного потока, лишённого ограничивающих его жестких стенок и не подвергающегося общей закрутке. Как уже показано нами в первой части этой работы, мы будем иметь осесимметричное истечение без водоворота. Нашими экспериментами доказано, что при определенных условиях, в таком потоке можно вызвать существование *одной* непрерывной цепочки вихрей *одного* знака, которые перемещаются вместе с потоком к отверстию; в результате суммирования этих вихрей над отверстием возбуждается водоворот. Знак водоворота соответствует знаку вращения вихрей, последние же



Фиг. 11

могут возбуждаться либо только положительные, либо только отрицательные (по желанию экспериментатора). Вызываемый таким способом водоворот легко управляется экспериментатором: он может быть легко возбуждаем, как и в любой момент может быть погашен. Мощность водоворота легко изменяется в большую или меньшую сторону. Если в потоке уже существовал водоворот, возникший при иных обстоятельствах, то возбуждая нашим способом водоворот обратного знака легко достигается истечение без водоворота. Таким образом открытое нашими опытами явление является не только средством возбуждения водоворота, но и действенным методом борьбы с ним. Это стало возможным после того, как удалось доказать, что косо поставленная в потоке пластина может создать цепочку вихрей *одного* знака, вихри же другого знака локализуются вблизи пластины и не поступают в поток.

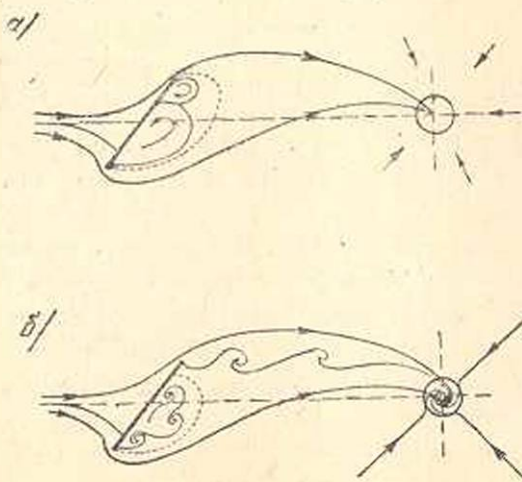
Ввиду того, что в этом случае влияние вихря на явление водоворота проявляется в чистом виде, то раньше чем перейти к опи-

санию теоретических соображений для построения физической модели вихревой теории водоворота, остановимся более подробно на результатах опытов с обтеканием пластины радиально-сходящимся потоком жидкости.

3. Обтекание косо поставленной пластины сходящимся потоком

Обтекание твердых тел плоско-параллельным потоком является одной из наиболее исследованных как экспериментально, так и аналитически задач гидродинамики. Случай же обтекания тел потоком, притекающим к отверстию, до сих пор остается мало исследованным. По крайней мере нам не известно ни одной из экспериментальных работ, посвященных этой задаче. Что касается аналитических решений, то известно решение плоской задачи безотрывного обтекания цилиндра сходящимся к точке потоком [9], а также решение пространственной задачи безотрывного обтекания эллипсоида потоком, сходящимся к точке [10].

Для наших целей задача обтекания сходящимся потоком состоящей пластины представляет большой интерес именно потому, что при обтекании такой пластины с отрывом струи оказывается возможно образование в потоке перемещающейся в нем одной цепочки вихрей одного знака. В настоящем параграфе мы приводим результаты нашего экспериментального исследования случая обтекания сходящимся потоком пластин с отрывом струй. Используемая для этого установка описана выше, в §1 главы I. В камере круглой формы, с центральным донным отверстием, поддерживался поток жидкости постоянной глубины. На пути потока, в некотором удалении от центра, обозначенном на фиг. 12 а буквой L,



Фиг. 12

устанавливалась в вертикальном положении пластина шириной B . Во время опыта при сохранении постоянными глубиной потока и расхода истечения жидкости через отверстие изменялся угол θ , который составляет пластина с радиальным направлением, а затем при постоянном угле θ изменялся расход истечения Q при одновременном сохранении неизменной глубины потока. Измеряемые величины были: расход жидкости Q , ширина пластины B , расстояние

L , глубина потока H и угол θ . Наблюдение за характером обтекания производилось внутри потока окрашиванием струек, а на по-

верхности — перемещением пылинок алюминиевой пудры, с помощью которой производилось также фотографирование картины обтекания пластины потоком.

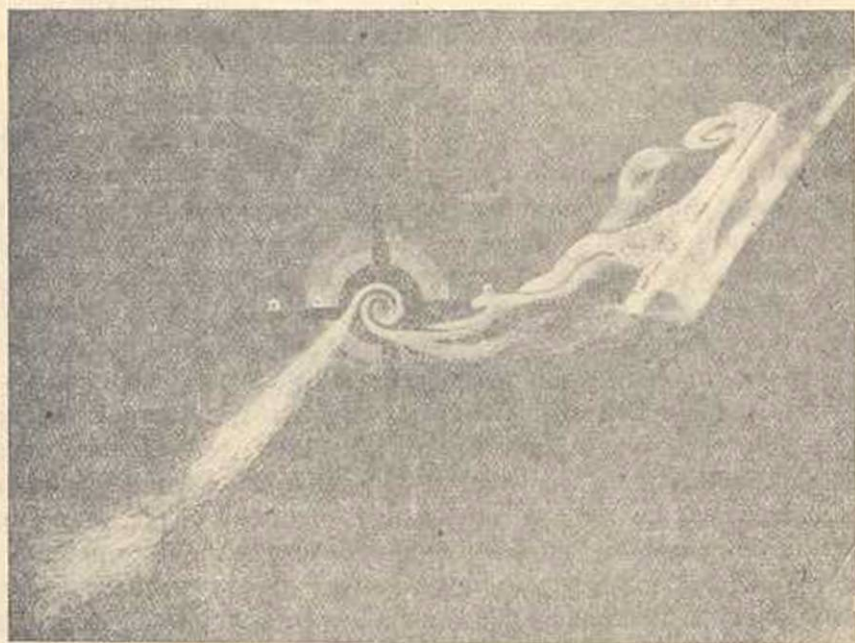
Опытами установлено, что при малых углах θ происходит плавное безотрывное обтекание пластины потоком без вихреобразований в камере.

Сохраняя параметры движения неизменными, но увеличивая угол θ до 45° , было замечено, что при малых скоростях набегающего потока на пластину сохраняется плавное обтекание ее, но при увеличении скоростей потока сперва за пластиной возникает застойная область жидкости с циркуляцией (фиг. 12а), а при дальнейшем увеличении скоростей (что практически осуществлялось увеличением расхода) размеры застойной области увеличивались и при некотором критическом состоянии с обоих концов пластины периодически отделялись вихри противоположного знака. Однако, дальнейшая судьба этих вихрей была различной. Вихри, отделявшиеся от ближнего к отверстию ребра пластины попадали в поток в свободном виде и, составляя непрерывную цепочку, перемещались вплоть до отверстия. Вихри обратного знака, отделявшиеся от противоположного ребра пластины (на фиг. 12б — нижнего), затягивались в застойную область циркулирующей за пластиной жидкости. Эти вихри совершенно не попадали в поток и не достигали отверстия. Энергия их шла на поддержание вращения жидкости застойной области и расходовалась на преодоление вязкого трения. На фигурах 13 и 14 сказанное хорошо иллюстрируется фотографиями, сделанными во время этих опытов. На этих снимках четко выявлены как застойные области за пластиной, в которых ясно видны три вихря, вовлеченные в них после отделения от заднего ребра пластины, а также вихри противоположного знака, образующиеся у переднего (на фигуре верхнего) ребра пластины, которые перемещаются к отверстию и вызывают образование водоворотов.

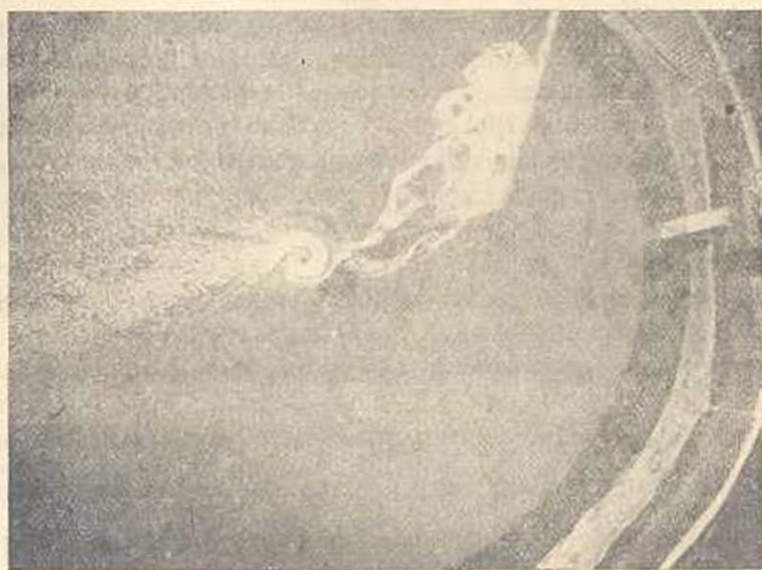
Характер вихреобразований по глубине потока наблюдался нами визуально по окрашенным струйкам и от руки делались зарисовки. Такая зарисовка изображена на фиг. 15. Эти наблюдения показывали, что вихри имеют вертикальную ось, которая сохраняет вертикальность также при перемещении своем от пластины до отверстия. Верхний конец вихря все время остается на свободной поверхности потока, а нижний — упирается в дно камеры.

Напряженность вихревых нитей при заданном положении пластины в потоке ($\theta = \text{const}$) зависела от ширины пластины B , глубины потока H , от расстояния пластины до отверстия L , от расхода истечения Q и, очевидно, от вязкости жидкости μ или $\nu = \frac{\mu}{\rho}$. Так как параметры L , H , Q по существу определяют скорость набегающего потока на пластину, то указанная зависимость характеризуется тремя параметрами: скоростью v , шириной B и вязкостью ν , т. е. теми же пара-

метрами, от которых зависит напряженность вихрей при обтекании тел плоско-параллельным [11] потоком. Таким образом для характеристики явления мы можем воспользоваться безразмерным числом Рейнольдса $\frac{vB}{\nu}$.

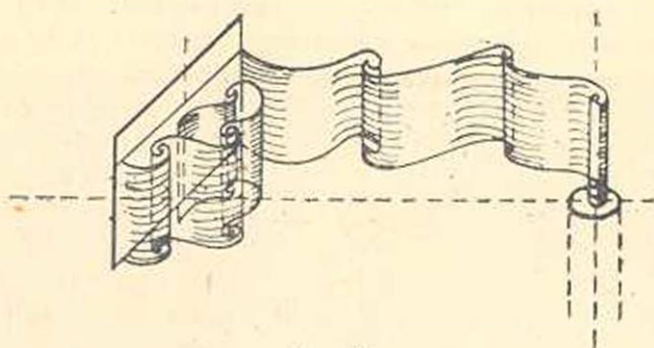


Фиг. 13.



Фиг. 14.

Переходя к вопросу о влиянии угла θ на характер явления следует отметить, что изменение угла θ вызывает изменение не только напряженности образуемых пластиною вихрей, но и качественного характера явления, наблюдаемого при этом в камере и над отверстием.



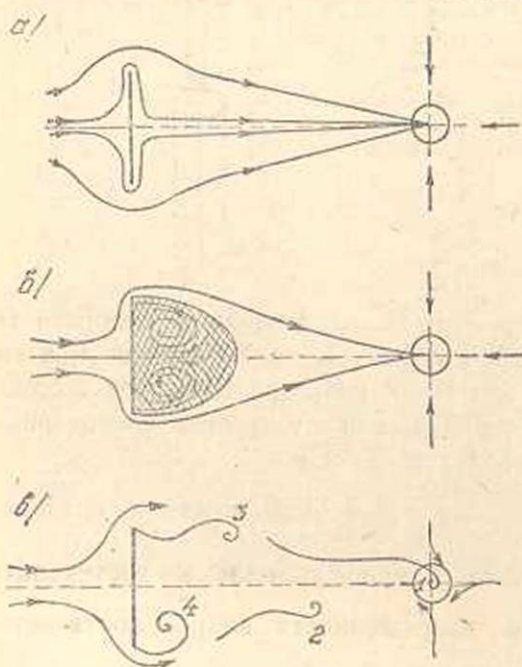
Фиг. 15.

Угол θ будем отсчитывать между направлением скорости течения при подходе к пластине в срединной точке отрезка В и направлением самого В. Тогда при $\theta = 0^\circ$ пластина совпадает с одной из линий тока радиального течения и ее присутствие в потоке никаких изменений в нем не вызывает.

При значениях $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ и определенной величине критерия $\frac{vB}{\nu}$ в потоке могут появляться вихри, вызываемые обтеканием пластины. При этом максимум напряженности вихрей достигается при $\theta = 45^\circ$. При $\theta = \frac{\pi}{2}$ отрыв вихрей от ребер пластины и поступление их в поток в свободном виде происходит при значительно большей величине критерия $\frac{vB}{\nu}$. Так, при $\frac{vB}{\nu} < 1280$ обтекание происходит без образования застойной области (фиг. 16 а). При $\frac{vB}{\nu} > 1280$ за пластиной образуется застойная область с двумя стационарными вихрями (фиг. 16 б). С увеличением безразмерного критерия эта область увеличивается, удлиняясь в сторону от пластины к отверстию, и при $\frac{vB}{\nu} > 14300$ картина течения резко изменяется: с концов пластины периодически отделяются вихри разных знаков, которые образуют две цепочки вихревой дорожки, сходящейся к отверстию. Обе цепочки вихрей начинаются у концов пластины и заканчиваются в центре над отверстием (фиг. 16 в). Периодичность отрыва вихрей от противоположных концов пластины создает шахматное расположение отдельных вихрей в обеих цепочках. Но ускоренное движение потока к центру вызывает увели-

чение расстояния между соседними одноименными вихрями в одной цепочке по мере приближения к центру.

При дальнейшем увеличении угла θ сверх $\frac{\pi}{2}$ до $\theta = \pi$ картина течения получается такая, как если бы мы наблюдали зеркальное изображение изменения течения при уменьшении угла $\theta \rightarrow 0$. И при $\theta = \pi$ мы получаем замыкание цикла всех возможных изменений течения при обтекании пластины сходящимся потоком.



Фиг. 16.

Интенсивность вихреобразований при заданном потоке можно легко увеличить (удвоить, утроить и т. д.) если с другой стороны отверстия установить пластину, симметричную первой. Так, на фиг. 17 дается фотография обтекания двух симметричных относительно центра отверстия пластин, установленных в потоке, который уже был изображен на фотографии-фиг. 13. Из сравнения обеих фотографий легко видеть увеличение мощности водоворота при двух пластинах.

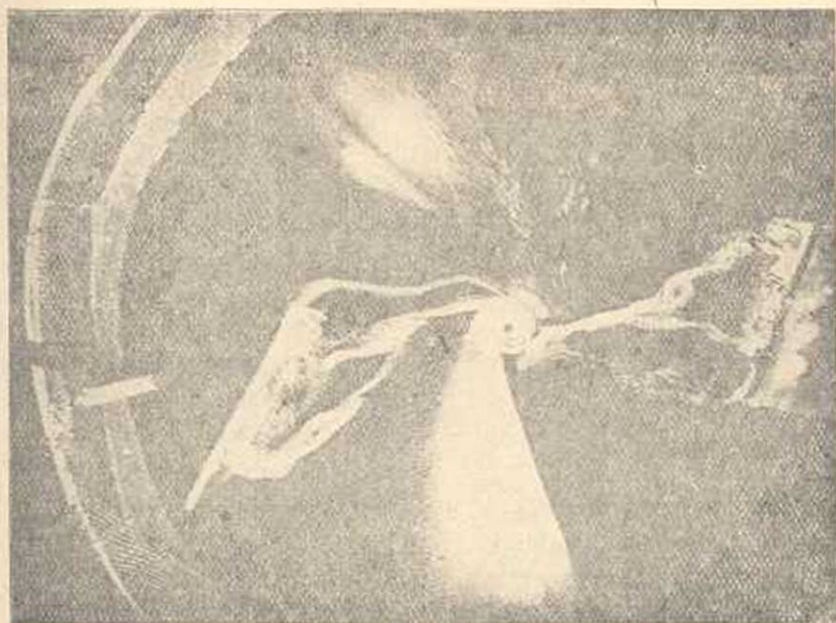
При расположении пластин в потоке, как это изображено на фиг. 18, поток будет содержать две вихревые цепочки с вихрями разных знаков. На оси отверстия эти вихри нейтрализуют друг друга и явление водоворота при этом не наблюдается.

Резюмируя изложенное мы утверждаем, что в отличие от плоско-параллельных потоков, при обтекании пластины сходящимся к центру потоком, при определенных условиях может возникать не пара цепочек вихрей, образующих вихревую дорожку, а одна цепочка, состоящая из вихрей одного знака. Вихри этой цепочки последовательно приближаются к отверстию, через которое происходит истечение жидкости из камеры и, суммируясь, образуют центральный вихревой шнур, который и вызывает водовороты.

4. Модель водоворота

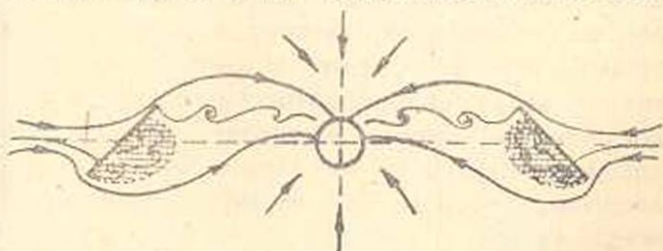
В основу теории образования водоворота мы кладем следующие положения: 1. Приток жидкости к донному отверстию происходит равномерно со всех сторон. 2. Течение в камере устано-

вившееся и имеет осевую симметрию. В некотором удалении от отверстия имеется один или несколько постоянных источников вихреобразований, от которых в поток поступают в свободном состоянии вихри одного знака, образующие цепочку, так что и к отверстию периодически и непрерывно подходят вихри одного знака и равной напряженности.



Фиг. 17.

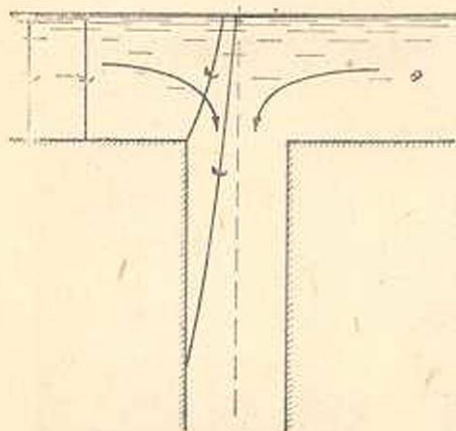
Вихри представляют собой вихревые нити с вертикальной осью и от источника они попадают в поток так, что верхний конец их упирается в свободную поверхность, а нижний в дно камеры. При подходе к отверстию верхний конец вихря задерживается на поверхности у вертикальной оси в то время, как нижний, по достижении по дну камеры края отверстия, переходит вместе с частицами жидкости на боковую поверхность отводящей



Фиг. 18.

трубы и перемещается по последней вниз. Вихрь, вследствие больших скоростей вращения частиц жидкости вблизи оси, вызывает понижение давления на оси, которое становится меньше атмосферного. Это вызывает местное понижение уровня над отверстием. Однако, обычно напряжение одной вихревой нити бывает недостаточным

для того, чтобы вызвать водоворот.* В дальнейшем за время, пока к отверстию подойдет последующий вихрь, первый вихрь подвергается диффузии за счет того, что ось вихря, перемещаясь вниз по трубе, удлиняется, а это вызывает уменьшение диаметра цилиндрического вихря, что приводит к уменьшению линейной напряженности вихревой нити. Такая диффузия от истечения жидкости в отверстие происходит равномерно и непрерывно, вследствие сплошности потока и установившегося характера истечения.

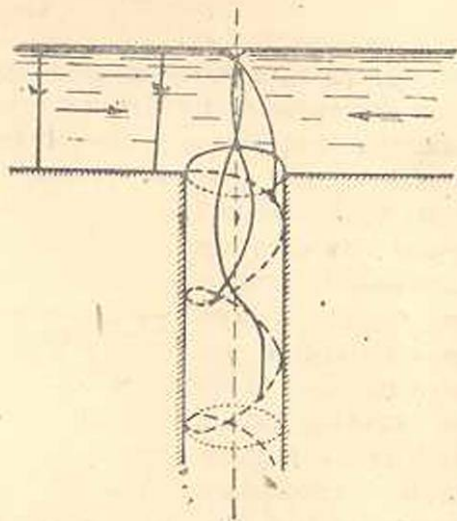


Фиг. 19.

Однако, еще до того, как напряженность первого вихря значительно уменьшится от диффузии, к отверстию подойдет второй вихрь цепочки, затем третий и т. д. (фиг. 19). Верхние концы всех вихрей остаются у поверхности, а нижние—перемещаются по трубе вниз.

Такое наложение вихрей суммирует их напряженность и увеличивает напряженность действующего на оси центрального вихря. Это увеличение напряженности происходит прерывисто, по мере подхода к отверстию очередных вихрей цепочки. Наряду с этим, вследствие взаимодействия скоростных полей суммируемых на оси вихрей, происходит наививание второго вихря на первый, на образующийся в результате шнур в последующем навивается третий вихрь, затем четвертый и т. д. (фиг. 20). В результате на оси образуется вихревой шнур, либо „центральный вихрь“, напряженность которого достигает величины, достаточной для развития таких циркуляционных скоростей частиц жидкости вблизи оси, при которых давление снижается настолько, что частицы потока вытесняются воздухом при атмосферном давлении. Развитие этого явления приводит к образованию глубокой воздушной полости над отверстием формы воронки, нижняя трубка которой, при неко-

Суммирует их напряженность и увеличивает напряженность действующего на оси центрального вихря. Это увеличение напряженности происходит прерывисто, по мере подхода к отверстию очередных вихрей цепочки. Наряду с этим, вследствие взаимодействия скоростных полей суммируемых на оси вихрей, происходит наививание второго вихря на первый, на образующийся в результате шнур в последующем навивается третий вихрь, затем четвертый и т. д. (фиг. 20). В результате на оси образуется вихревой шнур, либо „центральный вихрь“, напряженность которого достигает величины, достаточной для развития таких циркуляционных скоростей частиц жидкости вблизи оси, при которых давление снижается настолько, что частицы потока вытесняются воздухом при атмосферном давлении. Развитие этого явления приводит к образованию глубокой воздушной полости над отверстием формы воронки, нижняя трубка которой, при неко-

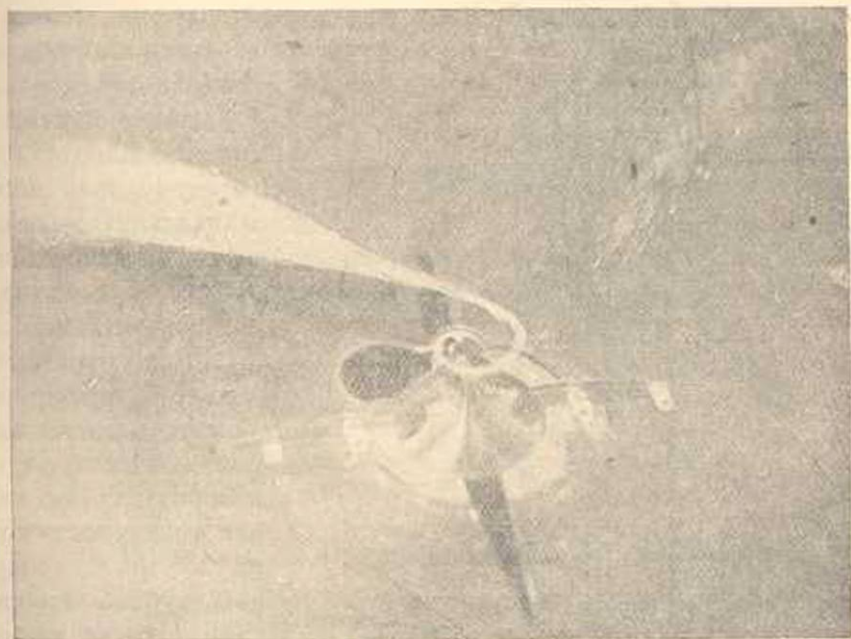


Фиг. 20.

* Случай, когда водоворот вызывается одним вихрем, описывается ниже, в § 5.

торых условиях может прорезать поток на всю глубину его и уходить вниз через трубу. На фотографии (фиг. 21) видна воздушная трубка водоворота, прорезающая весь поток.

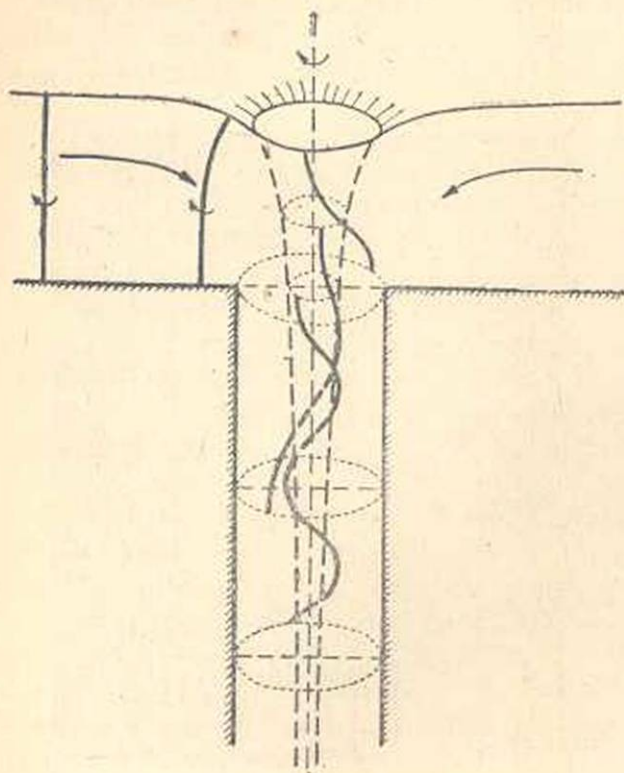
В последнем случае, который мы именуем развитой формой водоворота, меняется характер образования центрального вихревого шнура. С момента образования воздушной полости верхние концы подходящих к отверстию вихрей не задерживаются более у оси, а перемещаются по свободной поверхности потока внутрь воздушной трубки водоворота и вместе с частицами жидкости, его образующими,



Фиг. 21.

устремляются вниз по спиральной линии. Поскольку циркуляционные скорости частиц на поверхности воздушной трубки больше, чем в точках, далее отстоящих от оси вращения, то концы вихревых нитей вращаются с разными скоростями. Это вызывает навивание вихрей на воздушную трубку водоворота (фиг. 22). Как очевидно из сказанного, при развитой форме водоворота диффузия вихрей происходит не только вследствие удлинения вихревой нити, но и в результате полного засоса их в отверстие. В этом случае центральный вихрь, действующий на оси, представляет, как это ясно из фиг. 22, вихревой шнур без сердцевин. С этого момента дальнейшее повышение напряженности центрального вихря прекращается и водоворот приобретает „установившуюся“ форму, а вновь подходящие к отверстию вихри компенсируют диффузию центрального вихря за период между подходом двух последующих вихрей цепочки.

Описанная здесь модель водоворота предполагает, что в потоке имеются вихри только одного знака. В более общем случае, возможно существование также вихрей обоих знаков. При этом все рассуждения наши остаются в силе. Следует лишь отметить, что устойчивая форма водоворота будет сохраняться до тех пор, пока напряженность вихрей какого-либо знака превышает напряженность



Фиг. 22.

приносимых к отверстию вихрей обратного знака. В противном случае водовороты не образуются, а над отверстием на свободной поверхности потока наблюдается периодически меняющегося знака циркуляция частиц жидкости, вызывающая незначительную впадину поверхности над отверстием.

Наша модель водоворота хорошо объясняет явления, которые сопутствуют водоворотам. Так, гладкая поверхность потока внутри воздушной трубки водоворота периодически нарушается и принимает форму поверхности вращающегося вокруг вер-

тикальной оси винта—штопора. Этого и следовало ожидать. Действительно, навивание вихревой нити на поверхность воздушной трубки изменяет наклон вихря относительно оси, а так как частицы жидкости вращаются в плоскостях нормальных к вихревой линии, то перемещающийся вниз и навивающийся на воронку вихрь должен вызвать именно такое перераспределение скоростей частиц жидкости, которое вызывает изменение свободной поверхности по форме, похожей на поверхность штопора. При этом опытами подтверждается, что изменение поверхности соответственно описанному происходит начиная с того момента, когда к отверстию подходит очередной вихрь цепочки.

Второе явление, которое наблюдается при водоворотах и легко объясняется нашей моделью, состоит в следующем. Существование

развитой формы водоворота с интенсивным засосом воздуха через воронку обычно сопровождается звуком засасываемого воздуха, имеющим определенный тон. Тон этот не остается постоянной частоты, а модулирует. При проведении опытов нами установлено, что при подходе к отверстию каждого очередного вихря цепочки тон звука резко понижается, а затем постепенно снова повышается до первоначального тона к моменту подхода следующего вихря.

При подходе к отверстию нового вихря скачкообразно увеличивается напряженность вихревого шнура на оси, что приводит к увеличению диаметра воздушной трубки, а следовательно, должно вызвать понижение тона звука. Затем, вследствие диффузии вихря, напряженность его равномерно падает до первоначального значения; соответственно диаметр воронки также уменьшается и повышается тон звука засасываемого воздуха. Это повторяется периодически, через равные интервалы времени, соответственно периоду образования вихрей цепочки.

Практически весьма важное и интересное также в теоретическом отношении явление водоворота, поскольку, как показано выше, мы имеем дело с проявлением действия вихря в чистом виде, а понятие вихря является одним из самых главных понятий гидромеханики, нельзя считать уже полностью изученным. Многие сопровождающие водоворот явления, над которыми мы продолжаем теоретическую и экспериментальную работу, не затронуты совершенно в настоящей работе.

5. Водовороты периодически меняющегося знака вращения

Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, для возникновения водоворота центральный вихрь над отверстием должен обладать достаточной мощностью. Также показано, что это достигается последующим суммированием мощностей отдельных вихрей цепочки. Однако, может случиться, что мощность только одного вихря бывает достаточной для возбуждения водоворота. Такой случай, наблюдавшийся нами во время опытов и описывается здесь. В § 4 на фиг. 16в изображен случай образования дорожки вихрей в сходящемся потоке. Это имело место при значениях критерия $\frac{vB}{\nu} > 14300$.

Оказывается, что напряженность каждого вихря этой дорожки столь значительна, что каждый вихрь в отдельности вызывает водоворот. Но так как в этом случае подходящие последовательно к отверстию вихри имеют разные знаки, то наблюдается следующее, весьма эффективное явление. После подхода к отверстию первого вихря дорожки (фиг. 16в) возбуждается водоворот развитой формы с интенсивным засосом воздуха и с вращением по часовой стрелке. К моменту подхода к отверстию вихря—2 напряженность вихря—1 на оси отверстия вследствие диффузии в отверстие становится меньше напряженности вихря—2. Последний, расходуя часть своей

энергии, гасит первый вихрь, воронка водоворота исчезает, а остаточная энергия вихря—2 создает водоворот с направлением вращения против часовой стрелки, т. е. обратное водовороту от вихря—1. Затем к отверстию подходит вихрь—3. Аналогично предыдущему, он гасит водоворот от вихря—2 и вызывает водоворот обратного знака с вращением по часовой стрелке. Таким образом наблюдается



Фиг. 23 а.

периодическое, через равные интервалы времени, возникновение и исчезновение водоворотов чередующегося знака. Фотографии этого явления, сделанные рядом стоявшими двумя фотоаппаратами, зафиксировали два кадра из явления соответственно двум последующим водоворотам (см. фотогр. на фиг. 23 а и б).

б. Пульсационные явления, сопровождающие водоворот

При существовании водоворотов наблюдается пульсация мощности водоворота, а в некоторых случаях имеет место также вибрация конструкций водоприемных сооружений. Это легко объясняется нашей моделью водоворота, так как выше отмечалось, что мощность

центрального вихря, вызывающего водоворот, пульсирующе изменяется, оставаясь в то же время, в среднем за длительный промежуток времени, постоянной.

Взяв замкнутый контур (фиг. 24), охватывающий отверстие и источник вихреобразований мы заключаем, что вследствие отсутствия вихрей вне контура сумма напряженностей вихрей внутри



Фиг. 23 б.

контура должна равняться нулю. Следовательно, суммарная напряженность вихрей положительного знака (с вращением против часовой стрелки), образующийся у ребра В пластины и поддерживающая циркуляцию застойной области, заштрихованной на фиг. 24, должна равняться суммарной напряженности вихрей отрицательного знака (с вращением по часовой стрелке), образующихся у ребра А пластины.

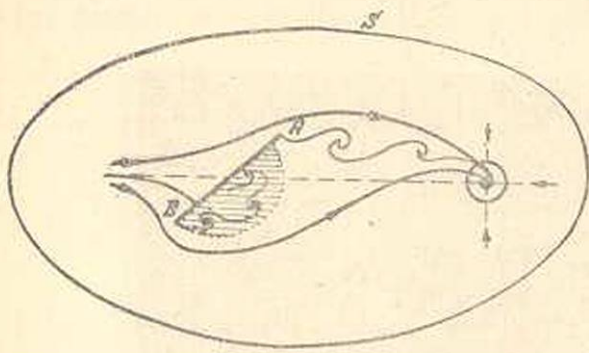
Последние вихри образуют центральный вихрь над отверстием, вызывающий водоворот.

Энергия вихрей в застойной области расходуется на вязкое трение и поддержание вращения жидкости застойной области.

Энергия центрального вихря подвергается диффузии вследствие

истечения жидкости через отверстие и поддерживает вращение части жидкости в водовороте.

Из необходимости равенства нулю циркуляции по замкнутому контуру s , мы непосредственно получаем, что диссипация энергии

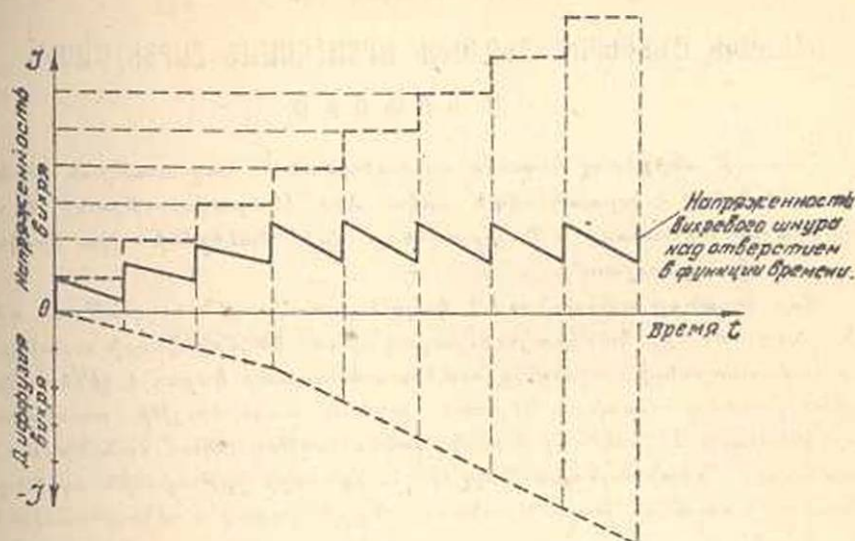


Фиг. 24.

вихрей в застойной области должна быть равной диффузии энергии центрального вихря над отверстием. Однако, это не всегда выполняется. Диффузия вихрей на оси отверстия может при больших расходах истечения также быть весьма большой, в то время как

в застойной области диссипация энергии зависит от большей или меньшей способности рассеивания энергии при вращении жидкости, что в первую очередь зависит от свойств жидкости — ее вязкости. И если в результате этого обстоятельства диссипация энергии вихрей в застойной области становится меньше диффузии вихря на оси отверстия, то тем самым нарушается закон равенства нулю циркуляции вдоль замкнутого контура s , что, вообще говоря, не может иметь места. Поэтому, в таких случаях наблюдается проскакивание отдельных единичных вихрей, образующихся у ребра В пластины в поток (вместо того, чтобы попадать в застойную область), и тогда эти единичные вихри перемещаются к отверстию, где и подвергаются диффузии.

Переходя к рассмотрению баланса энергии „центрального вихря“ над отверстием мы замечаем, что в данный момент времени напряженность „центрального вихря“ равна сумме напряженностей, поступивших в поток вихрей за вычетом диффузии их через отверстие. Пополнение энергии „центрального вихря“ происходит скачкообразно, с подходом к отверстию каждого нового вихря, а диффузия вихря, вследствие установившегося характера истечения, происходит непрерывно и равномерно (фиг. 25). Поэтому, напряженность „центрального вихря“ может быть изображена графически в зависимости от времени так, как показано на фиг. 25. Такое пульсирующее изменение мощности „центрального вихря“ вызывает периодическое изменение мощности водоворота; кроме того, также периодически меняется поле скоростей и давлений в области действия водоворота, а последнее является вероятной причиной вибрационных явлений, наблюдавшихся нами на некоторых конструк-



Фиг. 25.

циях напорных водопроводных сооружений, испытанных в лаборатории.

Автор считает своим приятным долгом принести глубокую благодарность академику А. И. Некрасову за ряд ценных замечаний по работе.

Институт Механики Академии Наук СССР,
Гидроэлектрическая Лаборатория
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 7 I 1948.

ЛИТЕРАТУРА

1. Umberto Cisotti—Idromeccanica Piana, ч. I, 1921.
2. А. И. Севко—К расчету шахтных водосливов, 1938.
3. Н. М. Шапов—Исследование Сызранской Гидростанции, 1934.
4. А. Гибсон—Гидравлика и ее приложение, 1934.
5. Л. Г. Подвидз—Влияние аэрации воды на кид гидравлических турбин. Гидротехническое строительство, № 1, 1939.
6. Л. Я. Шакунов—Метод борьбы с воронкообразованием над затопленными входными отверстиями гидротехнических сооружений. Изв. НИИГ, т. XXIII, 1938.
7. Д. Граве—В какую сторону должны вращаться горизонтальные гидравлические турбины. Изв. АН СССР, № 1, 1932.
8. Л. Прандтль и О. Тимьенс—Гидро и агро-механика, т. II, 1935.
9. L. M. Milne-Thompson—Theoretical Hydrodynamics, 1938, London.
10. М. Д. Миллионщиков—Гидродинамический анализ эксплуатации нефтяных скважин. Докторская диссертация, Институт Механики АН СССР, 1945, Москва.
11. Н. Е. Кочин и Н. В. Розе—Введение в теоретическую гидромеханику, 1932.

Հ. Խ. Խալիվախչյան

ՀԱՏԱԿԻ ԱՆՑՔԵՐՈՎ ՀԵՂՈՒԿԻ ԱՐՏԱՀՈՍՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հատակի անցքերով հեղուկի արտահոսման հետազոտություն հետևանքով սահմանված է արտահոսման երկու ձևի հնարավորությունը՝ 1. զուտ շառավղային արտահոսք և 2. արտահոսք ջրի մակերեսի վրա մրրկային ծագարով (ջրապտույտով)։

Ջրի հոսանքը պահպանում է կայուն շառավղային ուղղություն միայն այն դեպքում, երբ կամերայում բացակայում են մրրիկների առաջացման սկզբնապատճառները. այս դեպքում արտահոսումը կարող է լինել «ճնշումային» (առանց հոսանքի ներսում խզման մակերևույթի առաջացումի, կամ «կոնոիդի» ձև ունեցող խզման մակերևույթով), կամ «անճնշումային» արտահոսում՝ նման այնպես կոչված «հանքահորի ջրթափ»-ին, որը կայսմանավորվի հոսանքի խորությունով, անցքի չափով և արտահոսման ելքի մեծությամբ։

Հատակի անցքի հեղուկի արտահոսման ժամանակ մրրիկներ առաջացնող սկզբնապատճառները կարող են լինել՝ 1. հոսանքի ոչ համաչափ մոտեցումը դեպի անցքը, որ պայմանավորվում է կամերային (ջրավազանի) պլանային ձևով, 2. արտահոսման անկյունացած բնույթը, 3. կամերայում հոսանքը սահմանափակող պինդ պատերի մոտ առաջացող «սահմանային շերտը» և 4. շառավղային հոսանքի նկատմամբ որոշակի դրությունը տեղավորված աղեղների կամ նրանցով կազմած ցանցի ներկայությունը։

Փորձերով սահմանված է, որ ի տարբերություն հարթ-ղեզահեռ հոսանքների զուգամերձ շառավղային հոսանքներում կարող է տեղի ունենալ մեկ մրրկաշղթայիկ, որը բաղկացած կլինի միանիշ մրրիկներից։ Այս դեպքում մրրիկների նշանը և ինտենսիվությունը կախված կլինի հոսանքի վերաբերմամբ աղեղների դիրքից։

Եթե հոսանքի նկատմամբ աղեղնակն ունի համաչափ դիրք, ապա որոշ պայմաններում հնարավոր է առաջացնել պարբերաբար փոփոխվող նշանի ջրապտույտ։

Աշխատությունում հաստատված է, որ ջրապտույտն ունի մրրկային ծագում և առաջադրված է ջրապտույտների մրրկային տեսությունը։

Փորձերը ցույց են տվել, որ ջրապտույտների մրրկային տեսությունը հաստատում է բնութային մեջ նկատվող ջրապտույտների ինտենսիվություն պարբերական փոփոխումը և այլ առանձնահատկություններ։

Ընդգծված է, որ ջրապտույտի երևույթի վրա զգալի ազդեցություն ունի հեղուկի մակերեսային լարման փոփոխումը։

Հոսանքում տեղավորված աղեղնակն ստեղծում է ջրապտույտի երևույթը ղեկավարելու հնարավորություն, որը և միաժամանակ հանդիսանում է նրանց մարելու կամ առաջացնելու ունիվերսալ միջոց։