

С. М. ИСАКЯН

О ВОРОНКООБРАЗОВАНИИ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ
ИСТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ ИЗ ДОННЫХ ОТВЕРСТИЙ

1. Известно, что при истечении из круглого отверстия, расположенного в центре дна цилиндрического сосуда жидкость, несмотря на симметричность всех действующих сил, вращается относительно оси симметрии. Вследствие вращения давление над отверстием падает и на свободной поверхности образуется воронка.

Причину указанного явления обычно искали в нарушении симметрии действующих сил.

Здесь показано, что вращение жидкости относительно оси симметрии отверстия является следствием действия устойчивого винтового вихря, отражающего гидродинамическое сопротивление дна сосуда истекающей жидкости, для получения которого не требуется приложения асимметричных сил.

Измеренное автором с помощью шарового зонда пространственное поле скоростей в области воронки (рис. 1) показывает, что в сосуде имеет место сложное спиральное движение. После выхода из отверстия жидкость движется винтообразной струей с двумя выходящими жилками. Описанное приводит к выводу, что вращение в сосуде вместе со скрученной струей представляют одно общее винтообразное движение жидкости при ее истечении через отверстие.

Вследствие гидродинамического сопротивления кромки отверстия истекающей жидкости образуются вихревые кольца или, чаще, винтовой вихревой шнур.

В [1] доказана неустойчивость одноосных вихревых колец, расположенных перпендикулярно относительно оси симметрии колец, а в [2] — устойчивость винтового вихря в очень широком диапазоне его геометрической характеристики: $\lg \alpha = \frac{l}{2-a} > 0,3$ (l — шаг винта, a — радиус)

(рис. 2). Следовательно, более вероятно появление винтового вихря в струе, чем кольцевых вихрей.

Рассматриваемое явление аналогично образованию дорожки Кармана при обтекании тел в плоскости и является ее пространственным случаем.

В противоположность кольцевым вихрям винтовой вихрь обладает, кроме поступательной скорости вдоль оси потока, также вращательной составляющей относительно этой оси [2, 3], что вполне понятно. Это и является причиной вращения истекающей струи жидкости относительно оси симметрии отверстия. Заметим, что здесь безразлично: что именно явилось возбудителем винтового вихря. Важно, что винт есть устойчивая форма существования вихря, к которой могут стремиться любые другие.

Чтобы проверить влияние Кориолисова ускорения Земли на обра-

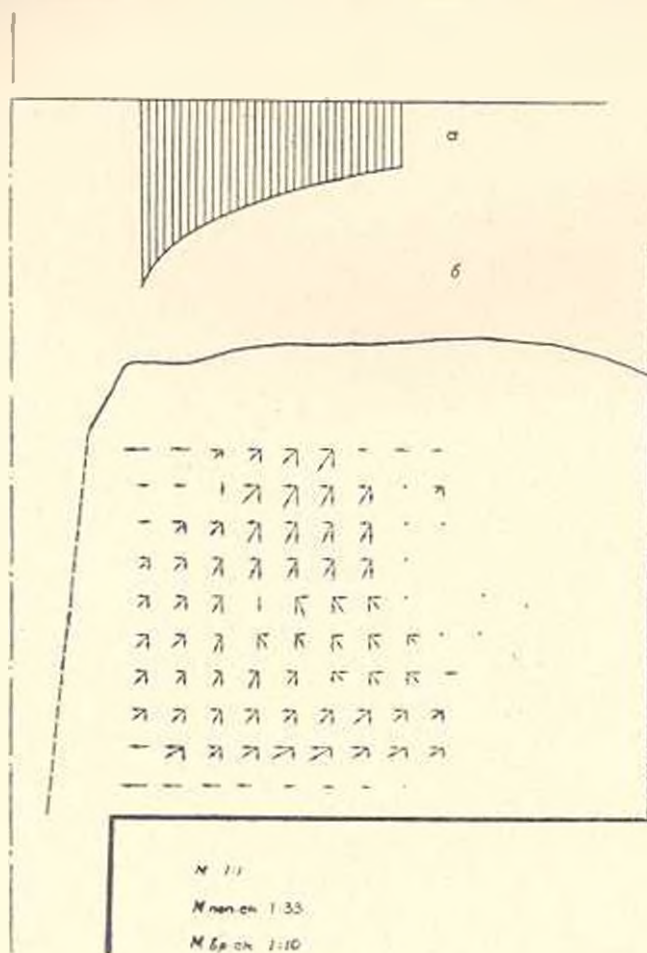


Рис. 1.

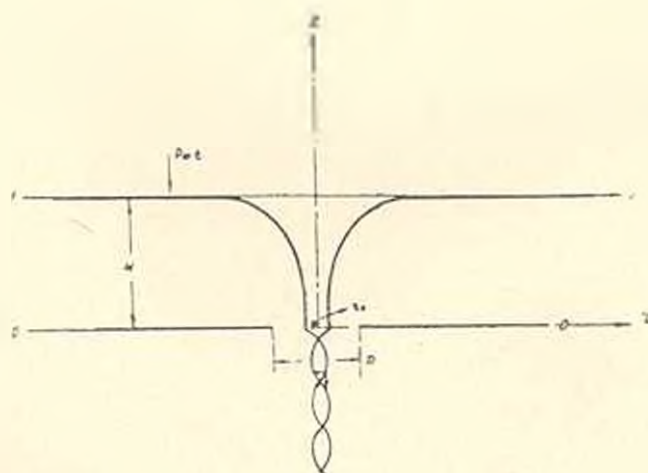


Рис. 2.

зование винтового вихря, автором были выполнены опыты по определению направления вращения вихря. Для осуществления истечения жидкости во всех направлениях: вниз, вверх, горизонтально, наблюдения велись как над окрашенной жидкостью, так и над воздушной струей, распространяющейся в воде. Последняя создавалась путем ввода воздуха через иглу шприца в стеклянную трубу, заполненную водой. Направление вращения в наблюдениях подчинялось закону электромагнитного поля. Следовательно, не вращение Земли определяет наблюдаемое вращение истекающей струи. Если даже оно окажется возбудителем винтового вихря, то только в качестве катализатора, направляющего движение к его устойчивой форме.

2 Согласно теореме Стокса винтовой вихрь должен индуцировать в жидкости и противовихрь, который в данном случае может быть как винтовым, так и прямолинейным. Если противовихрь винтовой, он будет обладать поступательной скоростью, направленной против движения истекающей жидкости, то есть в сторону резервуара. Стремясь к свободной поверхности жидкости, он сильно затормозил бы истечение жидкости из отверстия. Если же он прямолинейный, то не имел бы поступательной компоненты скорости в сторону свободной поверхности жидкости в сосуде. Поскольку наблюдения показывают, что на свободной поверхности жидкости в сосуде воронка образовывается и имеет пульсирующий характер, приходим к выводу, что в истекающей струе индуцируется именно винтовой противовихрь, который после выхода к свободной поверхности жидкости выпрямляется и уносится потоком. Как показывают наблюдения, этот процесс повторяется с почти закономерной частотой. Таким образом, устойчивый винтовой вихрь, будучи носителем гидродинамического сопротивления дна сосуда истекаемой из отверстия жидкости, является причиной образования как винтообразного движения струи за отверстием, так и вращения жидкости в сосуде, следовательно, причиной и воронкообразования.

3. Количество жидкости, пропускаемое отверстием в единицу времени

$$Q = \pi a_0^2 \sqrt{2gH}, \quad (1)$$

где a_0 — радиус отверстия, H — высота слоя воды над отверстием.

При действии сил сопротивления, выраженного винтовым вихрем в струе и воронкой в сосуде, пропускная способность отверстия будет ограничена полем действия винтового вихря. С целью количественной оценки этого воздействия рассмотрим поле скоростей винтового вихря.

В [3] показано, что продольная составляющая скорости вне цилиндра, огибающего ось винтового вихря, равна нулю. Внутри же этого цилиндра равна

$$\frac{\Gamma}{2\pi a_0^2 \lg \alpha} \quad (2)$$

В таком случае в единицу времени при винтовом вихре будет пропущена жидкость в количестве

$$Q_0 = \pi a^2 \frac{\Gamma}{2\pi a \operatorname{tg} \alpha} \quad (3)$$

В силу (1) и (3) коэффициент расхода отверстия

$$m = \frac{Q_0}{Q} = \frac{\pi a^2 \Gamma}{2\pi a \operatorname{tg} \alpha \cdot \pi a \sqrt{2gH}} \quad (4)$$

По условию непрерывности скорость в сечении отверстия, определенная по Торичелли, должна равняться таковой, определенной по (2)

$$\sqrt{2gH} = \frac{\Gamma}{2\pi a \operatorname{tg} \alpha} \quad (5)$$

С учетом (5) на основании (4)

$$m = \frac{a^2}{a_0^2} \quad (6)$$

Здесь радиус цилиндра a , занимаемого винтовым вихрем, определяется из следующих соображений. Поле скоростей винтового вихря вместе с противовихрем в поперечном сечении может быть представлено в виде пары антисимметричных прямолинейных вихрей. При построении линий тока этой пары вихрей при их поперечном обтекании равномерным потоком, получается нейтральная оболочка, изолирующая вихревую область от остального потока. Как показано в [4], линии тока внутри этой области не зависят от интенсивности вихрей, а полуоси этого контура определяются величинами: $1,73a$ и $2,09a$. Здесь a —полурасстояние между вихрями и в рассматриваемом случае—радиус цилиндра, огибающего винтовой вихрь. Так как винтовые вихри вращаются вокруг оси симметрии, то большой радиус $2,09a$ в данном случае ооконтуривает вихревую область. Совместив отмеченный контур нулевых скоростей с контуром отверстия с радиусом a_0 , получаем величину радиуса винтового вихря

$$a = \frac{a_0}{2,09} \quad (7)$$

В силу (7) на основании (6)

$$m = \frac{a_0^2}{2,09^2 \cdot a_0^2} = 0,229 \quad (8)$$

По экспериментальным данным [5] значение коэффициента расхода для круглых отверстий колеблется в пределах $0,178$ — $0,287$ и в среднем равно $0,233$, т. е. близко к расчетной величине (8).

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Levy, A. G. Forsdyke, Proc. Royal Soc., A 111, 1927, pp. 594-604.
2. H. Levy, A. H. Forsdyke, Proc. Royal Soc., A 120, 1928, pp. 670-990.
3. Н. Е. Жуковский. Избранные сочинения, т. 2, 1948, стр. 199.
4. Brillion. Recherches resentes sur diverses questions d'Hydrodynamique, 1891.
5. А. С. Гибсон. Гидравлика и ее приложения, 1934, стр. 93.

Р. Г. АЗАРЯН, А. А. БАБЛЯН

К ВОПРОСУ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ БАЛОК ИЗ ЛЕГКОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ

Исследования прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов из легких бетонов на естественных пористых заполнителях, насколько авторам известно, никем не производились. Между тем вопрос этот имеет важное значение при определении прочности и трещиностойкости изгибаемых элементов. В связи с этим в лаборатории сопротивления железобетона АН СМ по затронутому вопросу авторами в 1967 году были начаты систематические исследования. В статье приведены результаты первой серии опытов над 16-ю железобетонными балками из бетонов марок 250 и 350 на литондной пемзе.

Все балки имели размеры $200 \times 24 \times 15$ см и были армированы только продольной рабочей арматурой из стали класса А-III, диаметром 14 и 18 мм. Балки были испытаны на изгиб на 50-тонной универсальной машине ГРМ-1 по схеме, показанной на рис. 1. Одновременно по известной методике были испытаны контрольные бетонные кубы и призмы, а также образцы арматурных стержней для определения упруго-пластических и прочностных характеристик бетона и арматуры.

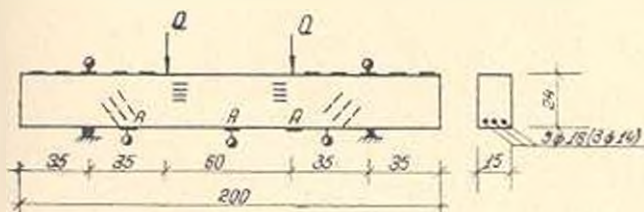


Рис. 1. Схема испытания балки: — датчики на бетоне;

А — датчики на арматуре; ● — индикаторы.

Испытания проводились с целью изучения влияния продольного армирования на процесс образования и развития наклонных трещин и характера разрушения по этим трещинам балок из легкого бетона. Появление и развитие наклонных трещин в ходе испытаний фиксировалось визуально и микроскопом с ценой деления 0,05 мм. Деформации бетона и арматуры замерялись тензодатчиками сопротивления, приклеенными к