

Андрей САМОФАЛОВ, Павел НОВИКОВ

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНА
БЕРНУЛЛИ**

Разработана и изготовлена лабораторная установка по изучению закона Бернулли. Установка предназначена для проведения лабораторных работ по разделу общей физики – «Механика жидкости и газа».

Designed and built laboratory facility to study the law of Bernoulli. The unit is designed for laboratory work on the section of general physics – "Mechanics of liquids and gas".

Введение. В 1738 году, как результат многолетней работы швейцарский физик Даниил Бернулли, опубликовал фундаментальный труд – «Гидродинамика».

Его труд являлся обобщением многовекового опыта множества ученых. Среди прочего, в этом труде, Бернулли публикует закон, впоследствии получивший его имя – закон Бернулли. Это открытие было большим прорывом, которое объясняло большое количество явлений динамики жидкостей и газов, таких как: эффект Магнуса, явление кавитации, впервые обнаруженное Р. Фрудом и прочее.

Изучение закона Бернулли школьниками и студентами необходимо для полного и действительно глубокого понимания курса динамики жидкости и газа. Но к сожалению, полноценное изучение этого закона зачастую невозможно вследствие отсутствия материальной базы, позволившей бы провести практическую работу. В связи с этим, была поставлена задача разработать и изготовить лабораторную установку по изучению закона Бернулли.

1 Закон Бернулли и его следствия

Закон Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости (или газа). Согласно закону Бернулли полное давление в установившемся потоке жидкости (или газа) остается постоянным вдоль этого потока. Полное давление состоит из гидростатического (ρgh), статического (p) и динамического $\frac{\rho v^2}{2}$ давлений:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости (или газа); v – скорость истечения жидкости; h – высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости (или газа); p – давление в точке пространства, где расположен центр масс рассматриваемого элемента жидкости (или газа); g – ускорение свободного падения.

Для горизонтальной трубы ($h = 0$) уравнение Бернулли принимает вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = const. \quad (2)$$

Рассмотрим истечение жидкости из малого отверстия находящегося в основании широкого сосуда. Приравняем полные давления на верхней поверхности жидкости (или газа) и на выходе из отверстия:

$$\rho gh + p_0 = \frac{\rho v^2}{2} + p_0,$$

где p_0 – атмосферное давление.

Отсюда

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

Выражение (3) – называется формулой Торричелли, она показывает, что при истечении идеальной несжимаемой жидкости (или газа) из малого отверстия в широком сосуде жидкость приобретает скорость, какую получило бы тело, свободно падающее с высоты h .

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения трубы, из-за возрастания скорости, то есть динамического давления, статическое давление падает. Это является основной причиной эффекта Магнуса.

Явление понижения давления при увеличении скорости потока лежит в основе работы различного рода расходомеров (например, труба Вентури), водо- и пароструйных насосов.

2 Лабораторная установка для изучения закона Бернулли

Как таковой закон Бернулли в чистом виде, довольно сложно представить в виде физической модели. Но его можно рассчитать и выполнить на прямом следствии – эффекте Вентури.

Эффект Вентури заключается в падении давления, когда поток жидкости или газа протекает через суженную часть трубы. Этот эффект назван в честь итальянского физика Джовани Вентури (1746–1822).

Простейшим устройством, на котором можно наблюдать эффект Вентури является труба Вентури.

Этот эффект связан с законом Бернулли самым прямым образом, и позволяет увидеть огромное многообразие проявления этого закона в окружающем нас мире. Так например при поливании цветов из садового шланга, мы можем перекрыть часть выходного отверстия пальцем, вследствие чего уменьшим площадь поперечного сечения, а значит увеличим скорость потока воды на выходе из шланга. От этого струя воды будет лить гораздо дальше.

Лабораторная установка для изучения закона Бернулли состоит из следующих частей (рисунок 1): 1 – труба переменного сечения; 2 – жидкостные манометры в виде стеклянных трубок; 3 – водяная помпа, приводимая в движение однофазным электрическим двигателем 4; 5 – соединительный гидропровод, уплотненный силиконовым герметикам в местах соединения.

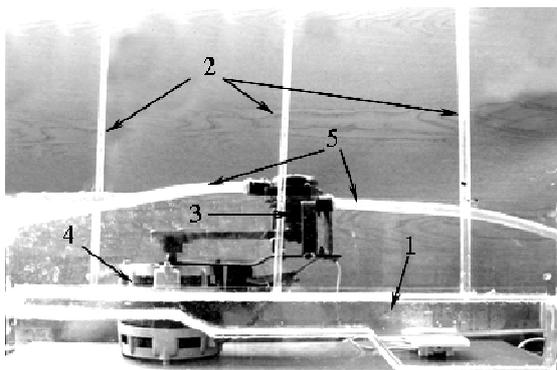


Рис. 1 – Лабораторная установка для изучения закона Бернулли

На основании закона Бернулли в данной установке можно определить скорость течения и расход жидкости в каждом сечении трубы.

Запишем уравнение Бернулли применительно к нашей установке (рисунок 2):

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 = \frac{\rho v_3^2}{2} + \rho g h_3 + p_3 \quad (4)$$

где $\frac{\rho v_i^2}{2}$ – динамическое давление в i -ом сечении трубы, $\rho g h_i$ – гидростатической давление (обусловленное перепадом высоты жидкости), p_i – статическое давление (рисунок 2).

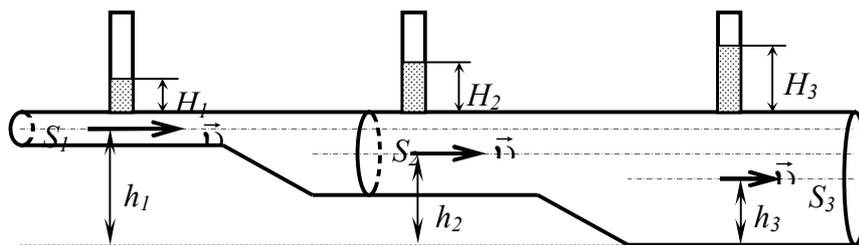


Рис. 2 – Труба переменного сечения

Гидростатической давление $\rho g h_i$ можно определить, измерив высоту жидкости h_i относительно основания трубы переменного сечения. Статическое давление p_i определим по высоте столба жидкости H_i в манометрических трубках: $p_i = \rho g H_i$ (рисунок 2).

Из условия не сжимаемости жидкости $S_1 v_1 = S_2 v_2 = S_3 v_3$, найдем скорость течения жидкости \bar{v}_1 :

$$v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2. \quad (5)$$

Подставив уравнение (5) в (4) получим выражение

$$\frac{\rho S_2^2}{2 S_1^2} v_2^2 - \frac{\rho v_2^2}{2} = \rho g(h_2 - h_1) + (p_2 - p_1),$$

из которого найдем скорость течения жидкости \bar{v}_2 :

$$v_2 = \sqrt{\frac{(p_2 - p_1) - \rho g(h_1 - h_2)}{\frac{\rho}{2} \left(\frac{S_2^2}{S_1^2} - 1 \right)}}.$$

Тогда скорости \bar{v}_1 и \bar{v}_3 , найдем из условия не сжимаемости жидкости: $v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2$ и

$$v_3 = \frac{S_2}{S_3} v_2.$$

Объемный расход жидкости, найдем из выражения $Q = \frac{V}{t} = S_i v_i$, где V – объем вытекающей жидкости, t – время истечения жидкости.

В данной установке в качестве жидкости используется вода, но уравнение Бернулли применимо только к идеальной жидкости, в которой силы вязкого трения отсутствуют. Но во всех реальных жидкостях при их движении возникают силы вязкого трения, на преодоление которых затрачивается часть энергии и в этом случае закон Бернулли не выполняется. Количественным критерием применимости уравнения Бернулли к движению вязкой жидкости является число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta},$$

где ρ – плотность жидкости, v – средняя скорость течения жидкости, l – длина трубы, η – коэффициент динамической вязкости.

Уравнение Бернулли допустимо применять к таким жидкостям, для которых $Re \gg 1$ [1]. Простые расчеты, дают значение Re для нашего случая $\sim 10^3$, что говорит о возможности использования воды и применимости уравнения Бернулли в данной лабораторной установке.

Использование именно такой установки (с изменяющейся высотой трубы), в учебном процессе, в ходе подготовки и проведения лабораторных работ по курсу «Механика», позволяет студентам четко различать понятия гидростатического и статического давления.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Петровский, И.И. Механика // Мн.: Изд-во Белорус. ун-та. – 1973. – 325 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самофалов Андрей Леонидович – старший преподаватель кафедры общей физики учреждения образования Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины.

Новиков Павел Петрович – выпускник физического факультета учреждения образования Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины.

Научные интересы: разработка учебного оборудования по физике.