



## Роль демонстрационного эксперимента в изучении уравнения Бернулли – закона сохранения энергии в гидравлике

Оксана Владимировна Сынашенко<sup>1</sup>✉, Алексей Сергеевич Игошин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

<sup>1</sup>oksana.synashenko@klgtu.ru

**Аннотация.** Обсуждается важность демонстрационного эксперимента в образовательном процессе при изучении курса физики. Он не только помогает в усвоении материала, но и развивает навыки критического мышления, мотивирует студентов и делает обучение более эффективным и увлекательным. Предложен демонстрационный стенд, разработанный курсантами Морского института, который иллюстрирует выполнение уравнения Бернулли – закона сохранения энергии в гидравлике, базового уравнения при гидравлическом расчете судовых трубопроводов.

**Ключевые слова:** демонстрационный эксперимент, уравнение Бернулли, гидростатический напор, скоростной напор, расчет трубопровода.

**Для цитирования:** Сынашенко О. В., Игошин А. С. Роль демонстрационного эксперимента в изучении уравнения Бернулли – закона сохранения энергии в гидравлике // Известия Балтийской государственной академии рыбопромышленного флота. – 2025. – № 3(73). – С. 212–216.

Демонстрационный эксперимент играет ключевую роль, как в ходе лекционных, так и при проведении практических занятий в курсе общей физики, где абстрактные идеи, законы и формулы могут быть трудны для понимания. Визуализация теоретических концепций помогает студентам лучше усваивать новый учебный материал.

Можно отметить и несколько других аспектов важности демонстрационного эксперимента в изучении физики:

1. увеличение вовлеченности студентов в процесс обучения. Наблюдение за экспериментом вызывает интерес и активное участие студентов, что может повысить мотивацию и желание изучать предмет;
2. развитие критического мышления. Демонстрационный эксперимент стимулирует обсуждение и анализ. Студенты могут задавать вопросы, делать предположения и обсуждать результаты, что развивает их критическое мышление и аналитические навыки;
3. устойчивое запоминание информации. Когда студенты видят эксперимент в действии, информация становится более запоминающейся. Это связано с тем, что визуальные и практические элементы способствуют формированию более прочных ассоциаций с изучаемым материалом.

При освоении курса физики студентами Морского института Калининградского государственного технического университета важную роль играет изучение раздела «Гидродинамика». Уравнение Бернулли является одним из ключевых принципов в гидродинамике, так как иллюстрирует связь между давлением, скоростью и напором при движении жидкостей и газов.

В морском деле уравнение Бернулли получило широкое применение в нескольких сферах кораблестроения:

1. при расчете систем трубопроводов судна [1];
2. при определении скорости судна с помощью гидродинамических лагов [2];
3. расчет расхождения судов в открытом море [3].

В настоящее время трудно представить себе полноценное функционирование судов транспортного флота и рыбопромышленного флота без различных систем трубопроводов. Трубопровод представляет собой совокупность труб и арматуры, предназначенных для перемещения жидкостей, паров или газов. Трубопроводы получили широкое применение во множестве судовых систем, таких как трюмно-балластные системы, санитарные системы, системы охлаждения, топливные системы, противопожарные системы [1].

Гидравлический расчет трубопроводов заключается в выборе внутренних диаметров труб, скоростей движения жидкостей и газов, производительности и давления гидравлических механизмов. В основе расчета лежат известные в физике уравнение неразрывности и уравнение Бернулли.

Отдельно можно выделить использование уравнения Бернулли в гидродинамических корабельных лагах, предназначенных для определения скорости движения корабля [2]. Действие гидродинамического лага основывается на измерении скоростного напора встречного потока воды.

Из курса физики [4] всем знакомо уравнение Бернулли, которое связывает три вида давления в жидкости или газе:

$$\rho g Z_1 + p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = \rho g Z_2 + p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (1)$$

и является законом сохранения энергии в гидравлике, то есть сумма гидростатического, статического и динамического давлений в текущей жидкости (или газе) при отсутствии трения есть величина постоянная:

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

Если в трубу вставить пьезометрическую (манометрическую) трубку, то в случае напорного движения жидкости (газа), она поднимется в трубке на высоту, соответствующую её давлению (рис. 1 б).

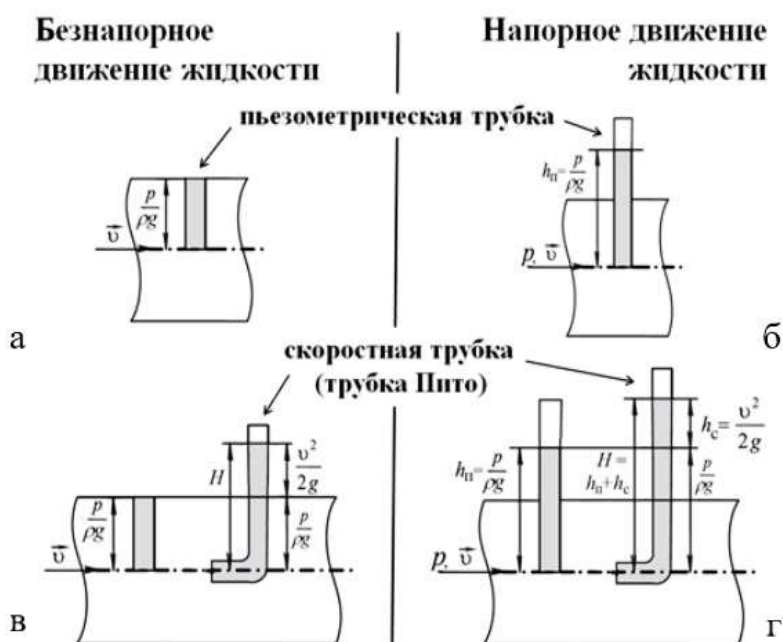


Рис. 1. Схемы определения пьезометрического и скоростного напоров движения жидкости с помощью пьезометра и трубки Пито для случаев безнапорного и напорного движений жидкости

Высота  $h_p = \frac{p}{\rho g}$  называется пьезометрической высотой или пьезометрическим напором,  $Z$  – это геометрическая высота (напор), ей соответствует  $\rho g Z$  – гидростатическое давление.



Третье слагаемое в уравнении Бернулли зависит от скорости движения жидкости.  $\frac{\rho v^2}{2}$  – это динамическое давление, а соответствующий ему напор  $\frac{v^2}{2g}$  – это скоростной напор.

Если в трубу вставить скоростную трубку (трубку Пито), то жидкость поднимется выше, чем в пьезометрической трубке (рис. 1 в, г), а разность их уровней равна скоростному

$$\text{напору } h_c = \frac{v^2}{2g}.$$

Уравнение Бернулли в трех формах записи представлено в таблице с перечислением всех его составляющих.

Таблица

**Уравнение Бернулли в трех формах записи**

в форме давлений	в форме напоров	в форме энергий
$\rho g Z_1 + p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = \rho g Z_2 + p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$	$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$	$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$
$\rho g z$ – гидростатическое давление	$Z$ – геометрическая высота (напор)	$gZ$ – удельная потенциальная энергия положения жидкости в рассматриваемом сечении струйки
$p$ – статическое давление	$\frac{p}{\rho g}$ – пьезометрическая высота (напор)	$\frac{p}{\rho}$ – удельная потенциальная энергия давления
$\frac{\rho v^2}{2}$ – динамическое давление	$\frac{v^2}{2g}$ – скоростная высота (напор)	$\frac{v^2}{2}$ – удельная кинетическая энергия
$\rho g Z + p$ – гидростатическое давление	$Z + \frac{p}{\rho g}$ – гидростатический напор	$gZ + \frac{p}{\rho}$ – удельная потенциальная энергия
$\rho g Z + p + \frac{\rho v^2}{2}$ – полное давление	$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$ – полный гидродинамический напор	$gZ + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ – полная удельная энергия

Закон Бернулли является универсальным в том смысле, что применим в различных средах: газовой, воздушно-газовой и жидкостной [3, 5].

Этот факт использовался при создании демонстрационного стенда, иллюстрирующего выполнение уравнения Бернулли на примере направленного потока воздуха. Стенд был разработан и собран курсантами Морского института КГТУ.

На демонстрационном стенде размещена модель трубы переменного сечения с тремя разными диаметрами и площадями сечений (рис. 2). Одно из широких сечений трубы соединено гибким шлангом с воздуходувкой, которая обеспечивает высокую скорость воздушной струи в трубе. К узкому сечению трубы присоединена пластиковая бутылка (рис. 3), что обеспечивает выравнивание давления в этом сечении и бутылке.

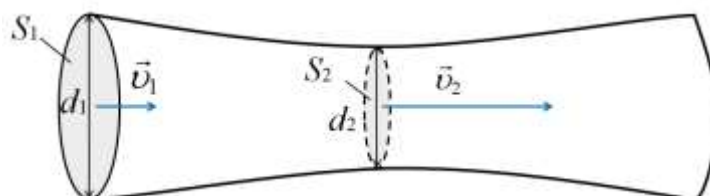


Рис. 2. Модель трубы переменного сечения

Равенство потока, проходящего по трубе объема жидкости или газа в единицу времени, в сечениях трубы с различными площадями обуславливает уравнение неразрывности:

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2, \quad (3)$$

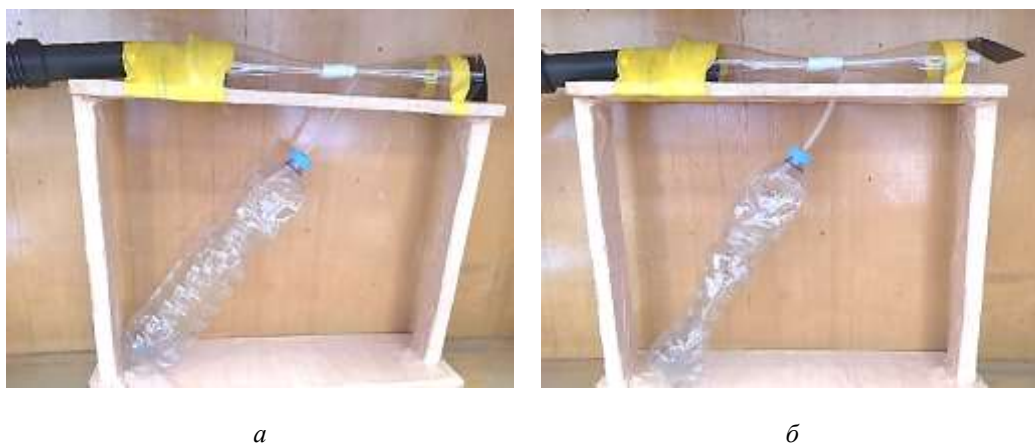
где  $v_1$  и  $v_2$  – скорость потока в сечениях с площадями  $S_1$  и  $S_2$  соответственно.

Оно означает, что скорость течения жидкости или газа больше в том сечении трубы, где площадь меньше. В нашей трубе диаметр первого сечения  $d_1=5,3$  см, а диаметр второго  $d_2=1,2$  см.

Таким образом получим следующее соотношение:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \left( \frac{5,3}{1,2} \right)^2 = 19,5 \approx 20.$$

Площадь второго сечения почти в 20 раз меньше площади 1-го сечения, а из уравнения неразрывности (3) следует, что скорость во втором сечении больше в 20 раз.



*Рис. 3. Демонстрация выполнения уравнения Бернулли*

Вернемся к уравнению Бернулли в форме напоров:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (4)$$

Так как труба горизонтальная, геометрические напоры  $Z_1$  и  $Z_2$  равны, тогда получим:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (5)$$

Если скорость во втором сечении больше, чем в первом, то скоростной напор во втором сечении по сравнению с первым увеличивается, а пьезометрический напор должен уменьшаться. Убеждаемся в этом на опыте. Если понизится давление в узком сечении трубы, то и в бутылке оно соответственно тоже понизится.

Когда по трубе пропустим воздушную струю, понижение давления внутри бутылки приводит к тому, что она сминается внешним атмосферным давлением (рис. 3 б). Данный эксперимент является наглядной демонстрацией выполнения уравнения Бернулли (5) для горизонтальной трубы переменного сечения.

Предложенный в статье демонстрационный стенд был разработан специально для лекционных демонстраций по физике, посвященных механике жидкостей и газов, и может быть использован при чтении лекций по курсам физики и гидравлики в любом техническом вузе.



Совместная работа над демонстрациями улучшает навыки коммуникации и взаимодействия между преподавателем и обучающимися, что повышает общий уровень подготовки студентов.

Данный подход также повышает мотивацию, так как студенты видят реальный результат своего труда и чувствуют ответственность за представление материала. Участие в разработке демонстраций способствует формированию навыков проектной работы и развитию практических компетенций [6].

#### **Список источников**

1. Овчинников, И. Н. Судовые системы и трубопроводы (устройство, изготовление и монтаж). – Ленинград : Судостроение, 1971. – 296 с.
2. Ермолаев, Г. Г., Андронов, Л. П., Зотеев, Е. С., Кирич, Ю. П., Черниев, Л. Ф. Морское судовождение. – URL: <https://flot.com/publications/books/shelf/shipnavigation/98.htm> (дата обращения: 20.06.2025).
3. Сюсюка, Е. Н. Применение закона Бернулли в судовождении / Е. Н. Сюсюка, А. Ю. Тульчинская, Ю. И. Тульчинский // Молодой ученый, 2020. – № 48(338). – С. 3–9.
4. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов. – Москва : Академия, 2006. – 560 с.
5. Кудинов, В. А. Гидравлика : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов. – Москва : Юрайт, 2018. – 386 с.
6. Корнева, И. П. Формирование навыков проектной работы в рамках обучения физике студентов технического вуза // Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота, 2024. – № 1(67). – С. 248–253.

#### **Информация об авторах**

О. В. Сынашенко – кандидат физико-математических наук, доцент;  
А. С. Игошин – курсант.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 24.07.2025; принята к публикации 28.07.2025.