

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ГРАФИЧЕСКАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы:

1) На трубопроводе переменного сечения проследить по пьезометрам переход энергии из потенциальной в кинетическую и обратно в соответствии с уравнением Бернулли.

2) По опытным данным построить в масштабе линии пьезометрического и скоростного напоров.

Оборудование и приборы: установка для исследования уравнения Бернулли, термометр, измерительная линейка, мерный сосуд, секундомер.

4.1 Теоретические сведения

Основное отличие реальной жидкости от идеальной – наличие у первой вязкости. Вязкость – первопричина, вызывающая потери энергии при движении жидкости. Различают динамический (η) и кинематический (ν) коэффициент вязкости, связанные между собой плотностью ρ жидкости.

$$\eta = \nu \cdot \rho, \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (4.1)$$

Вязкость зависит от рода жидкости, температуры, и в меньшей степени от давления. Для воды при атмосферном давлении кинематический коэффициент вязкости вычисляется по формуле Пуазейля:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t^{\circ}\text{C} + 0,000221(t^{\circ}\text{C})^2}, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (4.2)$$

Важную роль в гидравлике играет уравнение постоянства расхода:

$$Q = v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = \text{const}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.3)$$

Т.е., при установившемся движении жидкости объемный расход во всех поперечных сечениях трубопровода одинаков и равен произведению средней скорости v на площадь сечения ω .

Уравнение (4.3) является частным случаем закона сохранения вещества применительно к гидродинамике.

Основным уравнением практической гидродинамики является уравнение Бернулли, дающее связь между давлением, скоростью и геометрической высотой в разных сечениях трубопровода, и позволяющее объяснить множество природных явлений.

Это уравнение не менее значительно, чем, например, закон всемирного тяготения Ньютона и так же популярно, как и теорема Ферма в математике.

Для потока идеальной жидкости уравнение Бернулли имеет вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} = \text{const.} \quad (4.4)$$

Уравнение (4.4) можно истолковать с 2-х позиций: геометрической и энергетической (физической).

Рассматривая члены уравнения, легко убедиться, что каждый из них имеет размерность длины и показывает соответствующую высоту (рисунок 4.1):

Z - геометрическая высота (геометрический напор), представляющая собой ординату центра тяжести сечения относительно плоскости сравнения 0-0;

$\frac{p}{\rho g} = h_p; \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}} = \text{м} \right]$ - пьезометрическая высота (пьезометрический напор), характеризующая избыточное гидродинамическое давление в центре тяжести сечения в метрах столба жидкости;

$\frac{u^2}{2g} = h_v; \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}} = \text{м} \right]$ - скоростная высота (скоростной напор), равная разности уровней жидкости в скоростной трубке Пито и пьезометре.

Трубка Пито показывает избыточное гидростатическое давление в центре тяжести сечения. Применительно к идеальной жидкости избыточное гидростатическое давление всегда больше избыточного гидродинамического давления на величину, соответствующую скоростному напору, т.е.

$$p_{ст} = p_{дин} + \rho g h_v.$$

Т.о., геометрический смысл уравнения Бернулли (4.4) заключается в том, что слагаемые уравнения имеют линейную размерность, а их сумма для каждого сечения есть величина постоянная и равна полному напору истечения H_0 .

Энергетический смысл уравнения Бернулли заключается в том, что сумма удельной потенциальной ($Z + p/\rho g$) и кинетической ($u^2/2g$) энергий для потока идеальной жидкости, находящейся в установившемся движении, всегда постоянна. Под удельной энергией понимается энергия, которой обладает единица веса, массы или объема жидкости. С энергетической точки зрения уравнение (4.4) представляет собой частный случай закона сохранения и превращения энергии.

Для потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли имеет вид

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_f \quad (4.5)$$

Из сравнения уравнений (4.4 и 4.5) можно выделить следующие отличительные признаки:

1) Вместо скорости отдельной частицы идеальной жидкости (u) вводится средняя скорость потока (v).

2) Введён коэффициент кинетической энергии потока (α), учитывающий неравномерность распределения скоростей частиц жидкости по сечению трубы и зависящий от режима движения. Для ламинарного движения $\alpha_1=2$, а для турбулентного $\alpha_1=1$.

3) В правой части уравнения (4.5) появилось дополнительное слагаемое h_f , называемое потерянными напором, потраченным на преодоление гидравлических сопротивлений.

Таким образом, если для потока идеальной жидкости напор истечения H_0 в любом сечении трубопровода определяется суммой трёх слагаемых, то для потока реальной – четырёх слагаемых.

Это объясняется тем, что при переходе жидкости вдоль трубы от одного сечения к другому тратится часть удельной энергии на преодоление вязких сопротивлений, находящихся между этими сечениями, т.е. удельная энергия реальной жидкости по направлению её движения всегда уменьшается на величину потери напора h_f .

Итак, если для потока идеальной жидкости уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения механической энергии, то для потока реальной жидкости оно является уравнением баланса энергии с учётом гидравлических потерь.

Экспериментальные исследования учёных показали, что на величину потерь напора существенное влияние оказывают режимы движения жидкости: ламинарный и турбулентный. В ходе исследований выяснилось, что механизм потерь напора (удельной энергии) на преодоление гидравлических сопротивлений при ламинарном и турбулентном режимах существенно различен.

Физическая характеристика условий, определяющих режим движения, была найдена английским физиком Рейнольдсом. Он дал формулу и критерии, с помощью которых можно наверняка предсказать режим движения:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} . \quad (4.6)$$

Если $Re < Re_{кр} = 2320$ - режим ламинарный.

Если $Re > Re_{кр} = 2320$ - режим турбулентный.

Также одной из важнейших задач практической гидравлики, без решения которой применение уравнения Бернулли невозможно, является количественное определение потерь напора.

Не зная пока формул для количественного определения потерь напора, в этой работе потери напора находят как разность между уровнем воды в напорном баке и суммарным напором в сечении:

$$h_f = H_1 - \left(Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \right). \quad (4.7)$$

В необходимых случаях потери напора между сечениями определяют из формулы (4.5).

4.2 Схема установки

Установка для исследования уравнения Бернулли (рисунок 4.1) состоит из центробежной насосной установки 1, подающей воду из ванны 2 прямоугольной формы в напорный бак 3; сменного трубопровода переменного сечения 4; приёмного бака 5 и пьезометров 6. Напорный бак 3 снабжён сливной трубкой 7, благодаря которой уровень в баке 3 поддерживается постоянным. Уровни воды в баках определяют по показаниям водомерных стёкол 8. Для регулирования расхода воды в трубопроводе служит сливной кран 9 на дне приёмного бака 5, из которого вода сбрасывается в металлический лоток, а затем в ванну 2. Измерение расхода осуществляется при помощи мерного сосуда 10 и секундомера. Сменный трубопровод 4 крепится к фланцам 11 баков. Напорный бак 3 снабжён вентиляем 12 и заслонкой (на рисунке не показана).

4.3 Порядок выполнения работы

Прежде чем проводить исследования, необходимо подготовить установку к работе. Для этого нажатием пальца на кнопку магнитного пускателя включается электродвигатель, соединённый муфтой с центробежным насосом. Заслонку и вентиль 12 на напорном баке 3 следует открыть, а сливной кран 9 на приёмном баке 5 закрыть. Как только вода начнёт сбрасываться через сливную трубку 7 вентиль 12 закрыть, отключить электродвигатель и проверить уровни воды в водомерных стёклах 8 и пьезометрах 6. Они должны стабилизироваться на одной высоте H_1 . Причинами дестабилизации уровней могут быть: во-первых, наличие «воздушных пробок» в резиновых шлангах; во-вторых, засорение отверстий в штуцерах.

После устранения неисправностей следует заслонкой перекрыть трубопровод 4, а сливной кран 9 открыть для сброса части воды в приёмном баке 5 до уровня $H_2=10\dots 15$ см. Затем включить электродвигатель, заслонку и вентиль 12 открыть, а сливным краном 7 добиться стабилизации уровня H_2 . Этим приёмом достигается установившееся движение, для которого справедливо уравнение Бернулли. Регулирование расхода обеспечивается изменением уровня H_2 приёмном баке 5.

По готовности лабораторной установки к работе выполняются следующие операции:

- объёмным способом (с помощью мерного резервуара и секундомера) вычисляется расход и термометром измеряется температура воды в начале и в конце опытов; результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 4.1;

- измеряются расстояния сечений от выхода в трубопровод, показания пьезометров и водомерных стёкол и заносятся в таблицу 4.2;
- вычисляются площади поперечных сечений трубопровода, средние скорости воды в сечениях, числа Рейнольдса, скоростные напоры, потери напора и также заносятся в таблицу 4.2;
- опыты повторить при других значениях расхода.

4.4 Построение линий удельных энергий

Графически уравнение Бернулли для потоков идеальной и реальной жидкостей можно представить в виде удельных энергий. Построение линий удельных энергий упростится, если совместить плоскость сравнения 0-0 с осью горизонтального трубопровода, что позволит исключить из уравнения ординаты Z .

Пьезометрические высоты потока идеальной жидкости находят как разность между уровнем воды в напорном баке H_1 и скоростным напором в сечении при $\alpha=1$, т.к. линия скоростного напора совпадает с напорной плоскостью. Очевидно, что пьезометрическая линия ($a'b'c'd'e'f'$) будет параллельна плоскости сравнения на участках трубопровода с постоянным поперечным сечением (см. рисунок 4.1).

Для построения линий удельных энергий потока реальной жидкости используются численные значения пьезометрического и скоростного напоров из таблицы 4.2. Показания пьезометров дают возможность построить пьезометрическую линию ($abcdef$). Прибавляя в каждом сечении к отметкам пьезометрической линии скоростной напор можно построить линию скоростного напора. Построение этих линий желательно производить в масштабе на миллиметровой бумаге, причём горизонтальный и вертикальный масштабы могут быть разными.

На рисунке 4.1 приведена диаграмма изменения удельных энергий для потоков идеальной и реальной жидкостей.

Пьезометрическая линия потока реальной жидкости вдоль оси трубопровода снижается, следовательно, не параллельна ей, причём уклон линии тем больше, чем больше скоростной напор в сечении. На конически-сходящемся патрубке пьезометрическая линия снижается более резко, а на конически-расходящемся также резко возрастает, меняя знак уклона линии на противоположный, за счёт изменения скоростного напора.

Линия скоростного напора на участках трубопровода с постоянным сечением параллельна соответствующим отрезкам пьезометрической линии и вдоль оси трубопровода неизменно падает. Причём, она начинается не с напорной плоскости, а немного ниже в связи с местной потерей энергии (напора) при входе в трубу.

Область потерь удельной энергии (напора) на преодоление гидравлических сопротивлений расположена над линией скоростного напора и ограничена напорной плоскостью.

Таким образом, графическая иллюстрация уравнения Бернулли даёт наглядное представление о переходе одного вида удельной энергии в другой и

наоборот, о нарастании потерь удельной энергии вдоль трубопровода и позволяет количественно их оценить.

4.5 Обработка результатов

По результатам измерений вычислить:

- объёмный расход (Q) по методике, изложенной в п. 4.1;
- кинематический коэффициент вязкости (ν) по формуле (4.2);
- площадь сечения (ω) по формуле площади круга;
- среднюю скорость (v) в сечении из формулы (4.3);
- число Рейнольдса (Re) по формуле (4.6);
- скоростной напор (h_v) по формуле $\frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$;
- сумму пьезометрического и скоростного напоров;
- потери напора (h_f) в сечении по формуле (4.7).

Построить линии удельных энергий по уравнению Бернулли (4.4 и 4.5) для потоков идеальной и реальной жидкостей.

Таблица 4.1

Ёмкость мерного сосуда W , см^3	Время наполнения сосу- да t , с			Расход воды $Q = \frac{W}{t}$, $\text{см}^3/\text{с}$	Температура воды, $t^\circ\text{C}$			Кинематич. коэффициент вязкости (формула (2.2)) ν , $\text{см}^2/\text{с}$
	1	2	Средн.		1	2	Средн.	

4.6 Контрольные вопросы

- 1) В чём заключается геометрический и энергетический (физический) смысл уравнения Бернулли для потоков идеальной и реальной жидкостей?
- 2) В чём заключаются отличительные признаки уравнения Бернулли для потоков идеальной и реальной жидкостей?
- 3) Каковы условия применимости уравнения Бернулли?

Таблица 4.2

№ п/п	Наименование показателей	Сечения							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Расстояние сечения от входа в трубу l , см								
2	Показания пьезометров $\frac{p}{\rho g}$, см								
3	Диаметр сечения d , см								
4	Площадь сечения $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²								
5	Средняя скорость в сечении $v = \frac{Q}{\omega}$, см/с								
6	Число Рейнольдса $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$								
7	Коэффициент кинетической энергии α								
8	Скоростной напор в сечении $\frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$, см								
9	Сумма удельных энергий (напоров) в сечении $\frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$, см								
10	Потери напора от входа в трубу до сечения $h_f = H_1 - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g} \right)$, см								
11	Уровень воды в напорном баке, см, $H_1 =$								
12	Уровень воды в приёмном баке, см, $H_2 =$								

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебник / А.Д.Альтшуль, Л.С.Животовский, Л.П.Иванов. - М.: Стройиздат, 1987. - 413. - Библиогр.: с. 409.
- 2 Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике: Учебное пособие. / А.Д.Альтшуль, В.И.Калицун, Ф.Г.Майрановский и др.- М.: Стройиздат, 1976. – 256 с.
- 3 Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие. / Т.М.Башта. - М.: Машиностроение, 1973.
- 4 Большаков, В.А. Гидравлика: Общий курс: учеб. / В.А.Большаков, В.Н.Попов. - Киев: Вища. шк., 1989. - 215 с.: ил. - Библиогр.: с. 205-206.
- 5 Вильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. / Я.М.Вильнер, Я.Т.Ковалёв, Б.Б.Некрасов. - Минск: Высшая школа, 1985.
- 6 Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учеб. для вузов / Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.Б.Некрасов и др. - 2-е изд. перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с. - Библиогр.: с. 418.
- 7 Гидравлика, гидромашин и гидропневмопривод: учеб. пособие для вузов / под ред. С. П. Стесина. - М.: Академия, 2005. - 335 с. - (Высшее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 332.
- 8 Гидравлика и гидропривод: учеб. пособие / Н.С.Гудилин, Е.М.Кривенко, Б.С.Маховиков, И.Л.Пастоев; Ред. И.Л.Пастоев. - 3-е изд., стереотип. - М.: МГГУ, 2001. - 519 с.: ил. - (Высшее горное образование). - Библиогр.: с. 518.
- 9 Гидравлика: учеб. пособие для ВУЗов / А.Д.Тян, М.К.Скаков, Ю.К.Назаров, В.А.Петров. - Алма-Ата: Рауан, 1992. – 240 с.
- 10 Константинов, Ю.М. Гидравлика: учеб. для вузов / Ю.М.Константинов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Вища шк., 1988. - 398. - Библиогр.: с. 386.
- 11 Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник / Л.Г.Лойцянский. - 7-е изд., испр. - М.: Дрофа, 2003. - 840 с.
- 12 Механика жидкости и газа: учеб. пособие / Ред. В.С.Швыдкой. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: ИКЦ "Академкнига", 2003. - 462 с.: рис., табл. - Библиогр.: с.458.
- 13 Примеры гидравлических расчетов: Учеб. Пособие / Под ред. А.И. Богомолова - 2-е изд., перераб. - М.: Транспорт, 1977. – 526 с.
- 14 Сугуров, Ш.Б. Гидравлика (на казахском языке). / Ш.Б.Сугуров - Алматы, 1988. -198 с.
- 15 Ухин, Б.В. Гидравлика: учебник / Б.В.Ухин, А.А.Гусев. - М.: Инфра-М, 2008. - 431 с.: табл. - (Среднее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 413-416.