

218. ВОДОСТРУЙНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС

Введение

Принцип работы водоструйного вакуумного насоса

С помощью водоструйного насоса можно получать давления порядка 10 мм.рт.ст.

Устройство водоструйного насоса показано на рис. 1. В герметичную камеру насоса входят три трубки. Струя воды подается в трубку А, в которой имеется сужение, вставленное с небольшим зазором в воронку другой трубки (В), через которую вода уходит из насоса. Откачиваемый объем соединяется с камерой через трубку С.

Для понимания действия насоса необходимо знать закон Бернулли и уравнение непрерывности тока для идеальной жидкости.

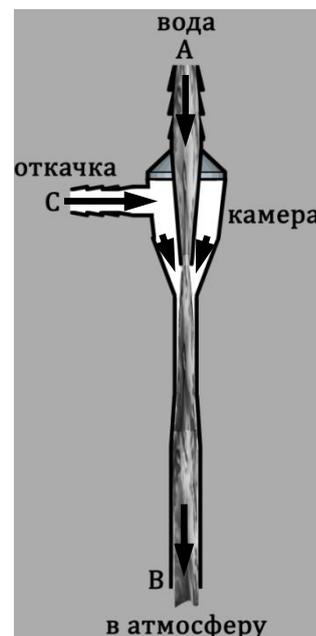


Рис. 1. Устройство водоструйного насоса

Закон Бернулли

Закон (уравнение) Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости вдоль любой трубки тока:

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

где ρ – плотность жидкости, v – скорость движения жидкости, g – ускорение свободного падения, h – высота над поверхностью Земли. Слагаемое $\frac{\rho v^2}{2}$ представляет собой объемную плотность кинетической энергии, ρgh – потенциальной энергии в поле внешних сил, а p – потенциальной энергии упругой деформации (давление). Их сумма определяет полную энергию единицы объема жидкости, которая в отсутствии диссипации является постоянной величиной в различных поперечных сечениях трубки тока. Константа в правой части часто называется полным давлением и зависит, в общем случае, от линии тока.



Даниил Бернулли (1700—1782)

Полное давление состоит из весового (ρgh), статического (p) и динамического ($\frac{\rho v^2}{2}$) давлений.

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости, то есть динамического давления, статическое давление падает.

Уравнение непрерывности тока идеальной жидкости

Уравнение непрерывности тока несжимаемой жидкости выглядит так:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 – площади поперечных сечений трубки тока, v_1 и v_2 – скорости жидкости в этих сечениях. Если высота сечений трубки тока меняется на небольшую величину, а их диаметры сильно отличаются (как это имеет место в нашем случае), можно пренебречь изменением потенциальной энергии в поле силы тяжести и использовать уравнение (1) в виде:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2. \quad (3)$$

Из (2) следует, что при переменном сечении трубки тока жидкость движется с ускорением. Согласно уравнению (3) это ускорение обусловлено непостоянством давления вдоль трубки – в местах, где скорость меньше, давление больше, что приводит к ускорению жидкости при перетекании ее в узкие места трубки тока.

Принцип действия насоса состоит в том, что вода, двигаясь с большой скоростью в узком отверстии верхней трубки (см. рис. 1 и уравнение (2)), увлекает за собой воздух из зазора между трубками. Так как прилегающие к струе слои воздуха движутся, давление в них (см. уравнение (3)) падает, что вызывает приток воздуха в зазор из камеры. Давление в камере уменьшается. С точки зрения гидродинамики процесс откачки прекратится, когда давление в камере станет равным давлению в струе жидкости, которое тем меньше, чем больше скорость струи.

Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры

Если при данных значениях температур и давления относительные количества пара и жидкости не меняются, то такой пар называют насыщенным. Связь давления насыщенного пара и температуры определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса. Из него, с учетом уравнения состояния идеального газа, а также того, что в условиях далеких от критических, объем жидкости на несколько порядков меньше объема газа, следует:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{TV} = \frac{LP}{T^2 R}. \quad (4)$$

Интегрируя последнее уравнение в предположении, что L не зависит от температуры, получаем.

$$\ln P = -\frac{L}{TR} + C, \quad (5)$$

где C – константа, характерная для данной жидкости.

Тангенс угла наклона графика этой зависимости, построенной в координатах $\ln P$ $1/T$, очевидно равен L/R . Значит, из изменений температурной зависимости давления насыщенного пара данного вещества можно определить значение его скрытой молярной теплоты испарения L .

Удельная теплота парообразования и конденсации (L) — физическая величина, характеризующая количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг вещества, взятому при температуре кипения, чтобы перевести его из жидкого состояния в газообразное, равна теплоте, выделяемой при конденсации пара, взятого при температуре кипения, в жидкость.

Таблица 1. Давление насыщающего водяного пара P в зависимости от температуры

t, °C	P, кПа								
0,00	0,61	8,00	1,07	16,00	1,80	24,00	2,96	32,00	4,71
0,50	0,63	8,50	1,11	16,50	1,87	24,50	3,04	32,50	4,84
1,00	0,65	9,00	1,15	17,00	1,92	25,00	3,13	33,00	4,99
1,50	0,68	9,50	1,17	17,50	1,95	25,50	3,23	33,50	5,12
2,00	0,71	10,00	1,21	18,00	1,99	26,00	3,33	34,00	5,27
2,50	0,73	10,50	1,27	18,50	2,08	26,50	3,43	34,50	5,41
3,00	0,76	11,00	1,31	19,00	2,17	27,00	3,53	35,00	5,57
3,50	0,79	11,50	1,35	19,50	2,24	27,50	3,64	35,50	5,73
4,00	0,81	12,00	1,39	20,00	2,32	28,00	3,75	36,00	5,89
4,50	0,84	12,50	1,44	20,50	2,39	28,50	3,85	36,50	6,05
5,00	0,87	13,00	1,48	21,00	2,47	29,00	3,96	37,00	6,23
5,50	0,89	13,50	1,53	21,50	2,53	29,50	4,08	37,50	6,40
6,00	0,93	14,00	1,59	22,00	2,61	30,00	4,20	38,00	6,57
6,50	0,96	14,50	1,64	22,50	2,69	30,50	4,32	38,50	6,74
7,00	1,00	15,00	1,69	23,00	2,79	31,00	4,45	39,00	6,93
7,50	1,03	15,50	1,75	23,50	2,87	31,50	4,57	39,50	7,12

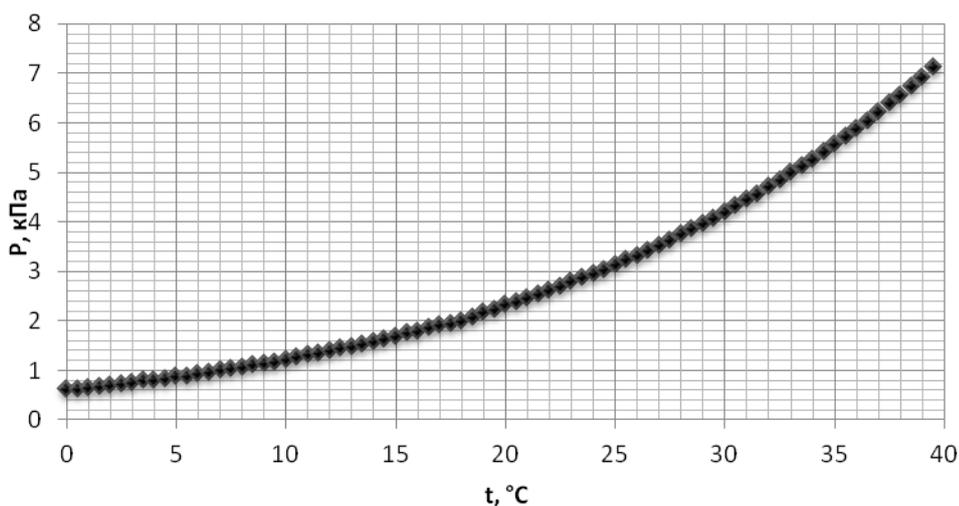


Рис. 2. График зависимости давления насыщающего водяного пара от температуры

Цель работы

- ✓ Знакомство с физическими принципами работы и устройством водоструйного насоса.

Решаемые задачи

- ✓ Освоение приемов работы с водоструйным насосом;
- ✓ Исследование зависимости скорости откачки от начального давления воды на входе насоса;
- ✓ Исследование влияния температуры воды на уровень вакуума.

Техника безопасности

- ✓ **Внимание: в работе используется стекло.**
- ✓ Будьте предельно аккуратны при работе с жидкостями при высокой температуре.

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Вентиль
- ✓ Манометр
- ✓ Пластиковый водоструйный насос
- ✓ Стеклоянный кран
- ✓ Стеклоянный вакууммируемый сосуд с двумя горлышками
- ✓ Термопара
- ✓ Вакуумметр Cassy
- ✓ Блок Cassy
- ✓ Компьютер
- ✓ Трубки резиновые вакуумные
- ✓ Штатив
- ✓ CASSY Lab 2

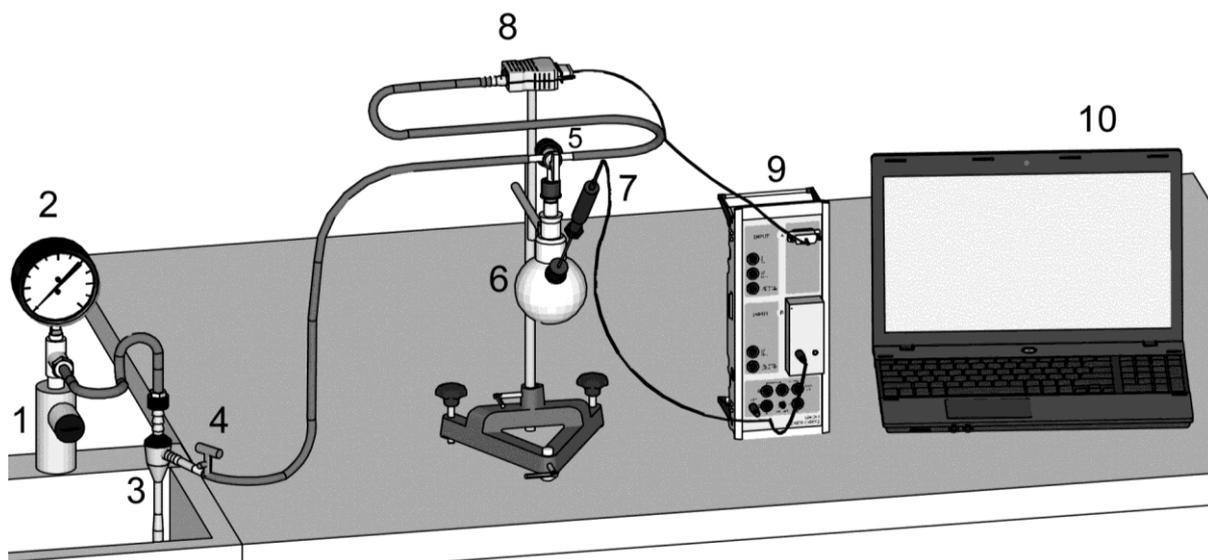


Рис.3 Экспериментальная установка для исследования работы водоструйного вакуумного насоса

В работе необходимо исследовать зависимость скорости откачки воздуха от начального давления воды на входе насоса и изучение влияния температуры воды на уровень вакуума. Схема установки представлена на рис. 3. Вода через вентиль (1) и манометр (2) подается в пластиковый водоструйный насос (3) и сливается в раковину. Отсасывающий штуцер насоса подсоединен к крану (4) и к тройнику (5), соединённым с вакууммируемым сосудом (6) с двумя горлышками. Боковое гнездо закрыто пробкой с термопарой (7). Давление в этом сосуде контролируется с помощью вакуумметра (8). Показания термопары и вакуумметра передаются на блок Cassy (9) и затем на персональный компьютер (10).

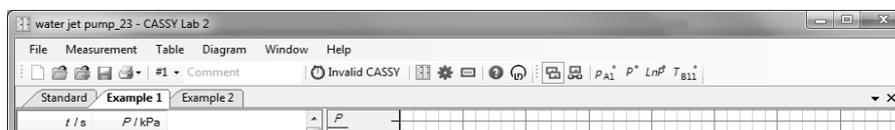
Порядок выполнения работы

Подготовка установки к работе

1. Проверьте, что сосуд без жидкости герметично соединен с водоструйным насосом и вакуумметром через стеклянный тройник с помощью резиновых вакуумных трубок (см рис 3)
2. Конец термопары должен быть вставлен в пробку на боковом гнезде сосуда

Упражнение 1. Снятие зависимости скорости откачки воздуха от начального давления воды на входе насоса

1. Загрузите настройки Cassy Lab2 с D/эксперименты/218_водостр_вакуум_насос. Перейдите в закладку «Example 1»:



2. Убедитесь, что стеклянный кран (4) открыт и не перекрывает связь с атмосферой. Плавно откройте вентиль крана (1) и установите на манометре давление воды $P_{\text{вх.н.}} = 250$ кПа.
3. Нажмите клавишу F9 на компьютере для начала измерений и сразу закройте стеклянный кран (4). На экране появятся результаты измерения времени откачки воздуха $t_{\text{отк}}$ и давления P в сосуде. Продолжайте измерения, пока давление в сосуде не достигнет минимального наблюдаемого значения. Обратите внимание, что в процессе откачки давление воды на манометре уменьшается. Регулировать это уменьшение не следует. Для завершения измерений нажмите клавишу F9.
4. После измерения закройте вентиль крана (1). Поверните стеклянный кран так, чтобы и давление в сосуде стало атмосферным.
5. Пронаблюдайте на экране компьютера график зависимости $P_{\text{вх.н.}}(t_{\text{отк}})$.
6. Повторите измерения, каждый раз уменьшая давление $P_{\text{вх.н.}}$ на 20 кПа до 100 кПа.
7. Объясните полученные результаты.

Упражнение 2. Изучение влияния температуры воды на уровень вакуума

1. Загрузите настройки CassyLab2 с D/эксперименты/218_водостр_вакуум_насос. Перейдите в закладку «Example 2».
2. Отсоедините колбу от вакуумной системы.
3. Осторожно налейте в колбу кипяток (предварительно ополоснув) так, чтобы кончик термомпары погрузился в него.
4. Подсоедините колбу к вакуумной системе.
5. Убедитесь, что стеклянный кран (4) открыт и не перекрывает связь с атмосферой.
6. Плавно откройте вентиль крана (1) и установите на манометре давление воды P примерно 250 кПа. Закройте стеклянный кран. Дождитесь закипания воды в колбе.
7. Нажмите клавишу F9 на компьютере для начала измерений. На экране появятся результаты измерения температуры T и давления $P_{\text{кам}}$ в сосуде.
8. Измерьте зависимость давления $P_{\text{кам}}$ от температуры воды T в колбе по мере остывания до комнатной температуры.
9. Пронаблюдайте на экране компьютера график зависимости $P_{\text{кам}}(T)$.
10. Сравните полученные данные с зависимостью давления насыщенного пара воды от температуры по справочным данным (Таблица 1, Рис. 2). Поверните стеклянный кран так, чтобы и давление в сосуде стало атмосферным.