

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

А.Р. Богомолов
Е.Ю. Темникова
И.В. Дворовенко

**РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ
ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СОСУДЕ
(ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКОЙ)**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и венти-
ляции» для студентов направления подготовки 08.03.01 Строи-
тельство всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления под-
готовки бакалавров 08.03.01 Строительство в качестве электронно-
го издания для выполнения лабораторной работы студентами всех
форм обучения

Кемерово 2019

Рецензент:

Шевырев С.А. – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики.

Богомолов Александр Романович, Темникова Елена Юрьевна, Дворовенко Игорь Викторович. Равновесие жидкости во вращающемся сосуде (относительный покой) [Электронный ресурс]: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство, всех форм обучения / А.Р. Богомолов, Е.Ю. Темникова, .В. Дворовенко. – Кемерово: КузГТУ, 2019. – Систем. требования: Pentium IV ; ОЗУ 8 Гб ; Windows XP ; (CD-ROM-дискковод); мышь. - Загл. с экрана.

Методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и вентиляции» и предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство всех форм обучения.

© КузГТУ
Богомолов А.Р.,
Темникова Е.Ю.,
Дворовенко И.В.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний по разделу «Гидростатика»: основное уравнение гидростатики; условие существования равновесия (относительного покоя); равновесие жидкости при наличии негравитационных массовых сил; инерциальные системы отсчета; первый и второй законы Ньютона, закон Паскаля.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Равновесие жидкости в покоящемся сосуде (абсолютный покой)

Дифференциальные уравнения равновесия жидкости. Уравнения Эйлера. Уравнения равновесия жидкости в проекциях на оси x , y и z (рис.1) будут:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho F_x; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \rho F_y; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \rho F_z, \quad (1)$$

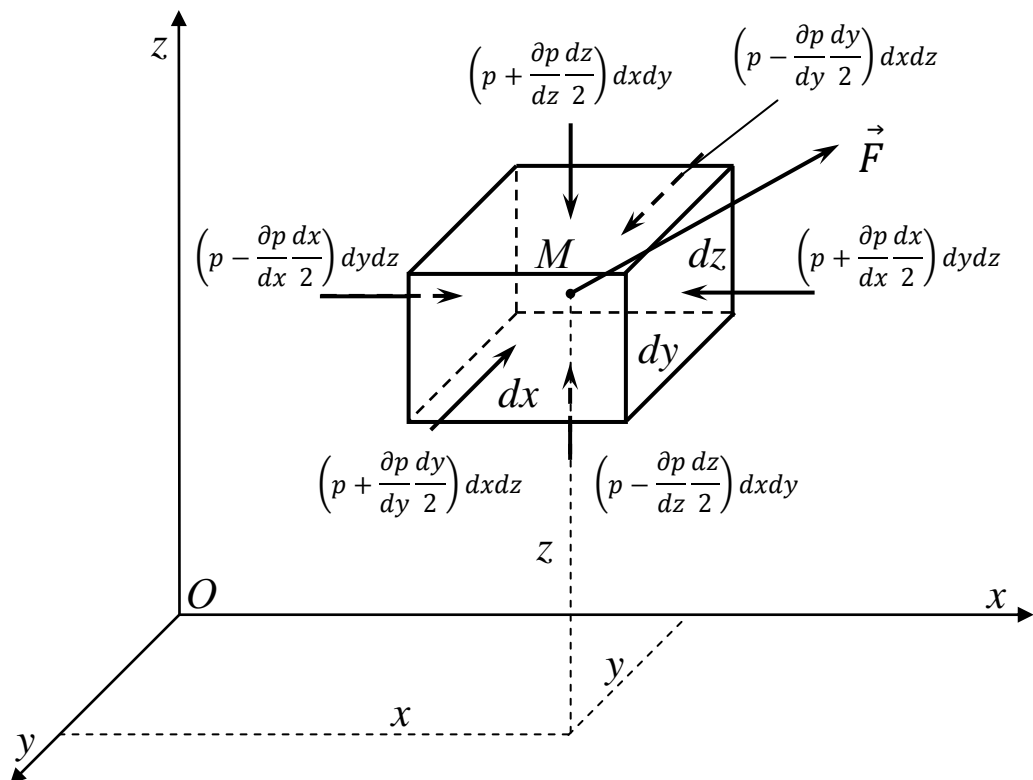


Рис. 1. К выводу основного уравнения гидростатики

где p – давление на соответствующие грани параллелепипеда, Па; ρ – плотность жидкости или газа, кг/м³; F_x , F_y и F_z – составляющие

массовой силы \vec{F} по проекциям на оси на единицу массы параллелепипеда, м/с^2 .

Уравнения (1) являются *основными дифференциальными уравнениями гидростатики* и называются *уравнениями Эйлера* равновесия жидкости или газа.

Если систему (1) умножим последовательно на dx , dy и dz и сложим, то получим

$$\rho(F_x dx + F_y dy + F_z dz) = dp. \quad (2)$$

Поверхности равного давления. Поверхность, в каждой точке которой давление одинаково, называют *поверхностью равного давления* или *поверхностью уровня*.

Если в уравнении (2) положить $dp = 0$ при $\rho \neq 0$, то получим дифференциальное уравнение семейства поверхностей равного давления

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz = 0. \quad (3)$$

Основное уравнение гидростатики. При рассмотрении жидкости, покоящейся в сосуде, видно, что действующей на жидкость массовой силой является только сила тяжести $\vec{G} = mg$. Тогда $\vec{F} = g$.

Направив ось OZ вертикально вверх, получим

$$F_x = 0; F_y = 0; F_z = -g,$$

а подставив полученные величины в (2), будем иметь

$$dp = -\rho g dz. \quad (4)$$

Интегрируя (4) в предположении $\rho = \text{const}$ и принимая, что в пределах рассматриваемого объема жидкости можно пренебречь изменением ускорения свободного падения по высоте z ($g = \text{const}$), получаем

$$p + \rho g z = C, \quad (5)$$

где C – произвольная постоянная.

Разделив (5) на ρg или на ρ , получим соответственно

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const} \text{ или } gz + \frac{p}{\rho} = \text{const}. \quad (6)$$

Для двух точек одного и того же объема покоящейся жидкости уравнения (6) соответственно представляются в виде

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \text{ и } gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}. \quad (7)$$

Уравнения (7) выражают *гидростатический закон распределения давления* в однородной несжимаемой жидкости, покоящейся

относительно земли; их обычно называют *основными уравнениями гидростатики*.

Пример для поверхности равного давления. Основное уравнение гидростатики можно записать иначе. Рассмотрим жидкость, покоящуюся в открытом резервуаре (рис. 2).

Необходимо определить давление p в точке A на уровне z . Применим основное уравнение гидростатики (7) к точке A и к точке

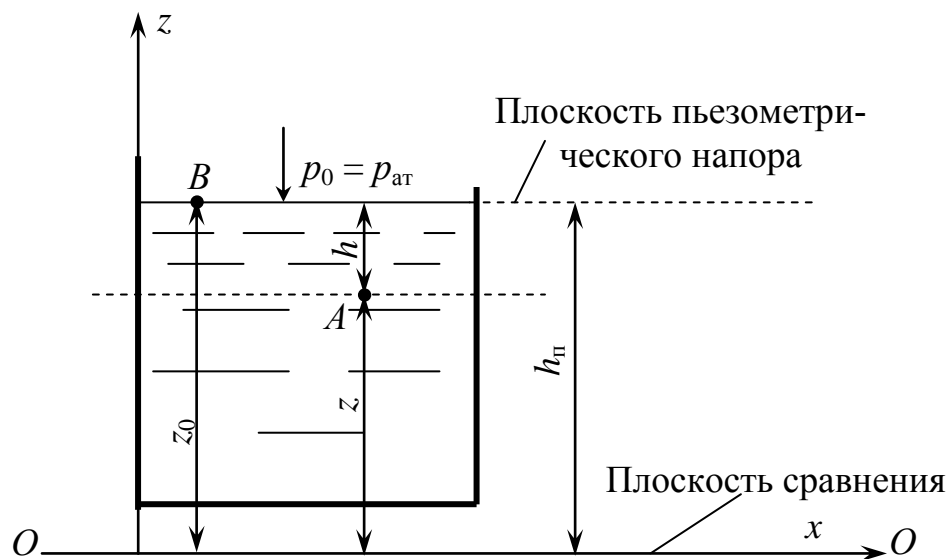


Рис. 2. К определению давления в точке ниже уровня свободной поверхности

B , расположенной на свободной поверхности на уровне z_0 . Давление на свободной поверхности равно p_0 , его называют *внешним давлением*, тогда

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g} \text{ или } p = p_0 + \rho g(z_0 - z) \quad (8)$$

где $z_0 - z = h$ – глубина погружения точки под свободной поверхностью.

Тогда

$$p = p_0 + \rho g h. \quad (9)$$

Иногда давление p называют *абсолютным давлением* и обозначают $p_{\text{абс}}$.

2.2. Равновесие жидкости во вращающемся сосуде (относительный покой)

Равновесие жидкости в цилиндрическом сосуде, равномерно вращающемся относительно вертикальной оси. Рассмотрим цилиндрический сосуд радиусом R (рис. 3), заполненный до некоторого уровня H жидкостью плотностью ρ и приведенный во вращение с постоянной угловой скоростью ω относительно вертикальной оси.

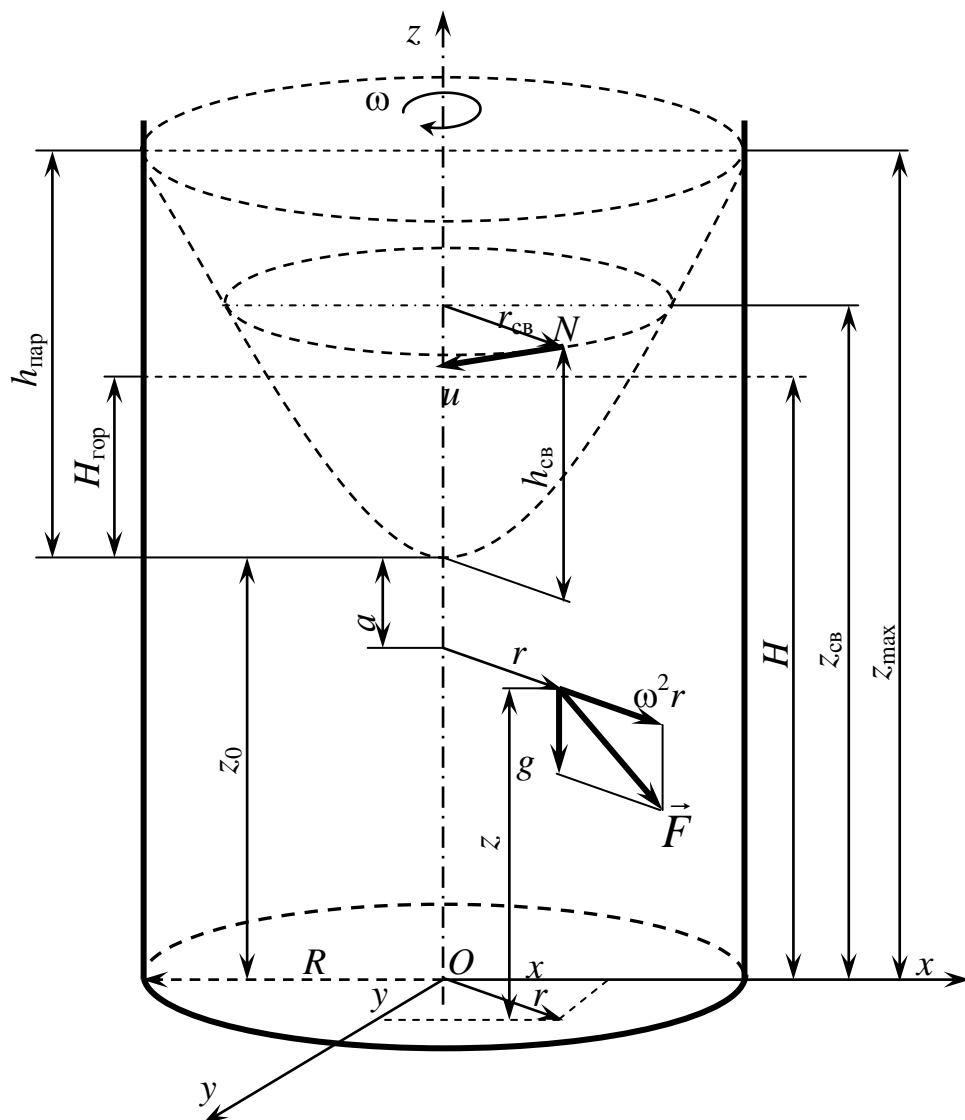


Рис. 3. Цилиндрический сосуд с жидкостью, равномерно вращающийся относительно вертикальной оси

Через некоторое время после начала вращения сосуда жидкость под действием сил трения будет вращаться с той же скоростью, что и сосуд. Установится равновесие жидкости (относительный покой) относительно сосуда или, иначе говоря, относительно

вращающейся вместе с сосудом неинерциальной системы координат x, y, z .

При написании уравнений равновесия в *неинерциальной* системе необходимо в число действующих сил вводить переносную силу инерции. В рассматриваемом случае такой силой является центробежная сила, направленная вдоль радиуса и равная для элементарной массы m , вращающейся на расстоянии r от вертикальной оси с угловой скоростью ω :

$$\vec{F}_1 = m\omega^2 r. \quad (10)$$

Кроме центробежной силы, на любую частицу массой m действует сила тяжести

$$\vec{F}_2 = mg. \quad (11)$$

Проекции вектора плотности распределения (отнесенной на единицу массы) массовых сил при этом:

от переносной силы инерции

$$F_{x1} = \omega^2 x; F_{y1} = \omega^2 y; F_{z1} = 0;$$

от силы тяжести

$$F_{x2} = 0; F_{y2} = 0; F_{z2} = -g,$$

где x и y – горизонтальные координаты произвольно выбранной точки N жидкости.

Форма поверхностей равного давления. Используем уравнение поверхности равного давления (3) и, подставляя в него выражения проекций векторов плотности распределения массовых сил, для F_x, F_y и F_z найдем

$$\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz = 0.$$

После интегрирования получим

$$\frac{\omega^2}{2} (x^2 + y^2) - gz = C$$

или, поскольку $x^2 + y^2 = r^2$,

$$\frac{\omega^2 r^2}{2} - gz = C. \quad (12)$$

Из (12) видно, что поверхности равного давления в рассматриваемом случае представляют собой семейство конгруэнтных (совмещающихся при наложении) параболоидов вращения с вертикальной осью. Различным значениям постоянной C соответствуют разные параболоиды равного давления.

Свободная поверхность также является поверхностью равного давления, во всех точках которой давление равно внешнему давлению.

нию p_0 . Найдем значение произвольной постоянной C для параболоида свободной поверхности. Координаты вершины параболоида:

$$x = 0, y = 0, z_{\text{св}} = z_0.$$

Подставив эти координаты в уравнение (12), получим

$$C = -gz_0.$$

Уравнение свободной поверхности параболоида в обозначениях рис. 3:

$$z_{\text{св}} - z_0 = \frac{\omega^2}{2g}(x^2 + y^2) \text{ или } z_{\text{св}} - z_0 = \frac{\omega^2 r^2}{2g} \text{ или } z_{\text{св}} = z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g}. \quad (13)$$

Определение высоты параболоида и точки свободной поверхности над вершиной параболоида. Частица жидкости, находящейся в состоянии относительного покоя во вращающемся сосуде, расположенная на расстоянии радиуса r от оси вращения, имеет линейную скорость

$$u = \omega r. \quad (14)$$

Высота, на которую поднята над вершиной параболоида точка свободной поверхности (например, точка N), равна

$$h_{\text{св}} = z_{\text{св}} - z_0 = \frac{\omega^2 r^2}{2g} = \frac{u^2}{2g}. \quad (15)$$

Высоту параболоида $h_{\text{пар}}$ от его вершины до касания свободной поверхности (поверхности равного давления) вращения со стенкой цилиндра определяем по уравнению (13) из условия, что $r=R$, тогда

$$h_{\text{пар}} = \frac{\omega^2 R^2}{2g}. \quad (16)$$

Ордината z_0 вершины параболоида свободной поверхности при заданной угловой скорости зависит от объема жидкости в сосуде. Если до вращения сосуда уровень жидкости был горизонтальным и устанавливался на высоте H , то объем жидкости равняется

$$V = \pi R^2 H.$$

При вращении сосуда свободная поверхность становится параболической, форма объема жидкости изменяется, а его значение при $\rho = \text{const}$ остается неизменным:

$$\int_0^R \left(z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \right) 2\pi r dr = \pi R^2 H.$$

После интегрирования имеем

$$H = z_0 + \frac{\omega^2 R^2}{4g} \text{ или } z_0 = H - \frac{\omega^2 R^2}{4g}. \quad (17)$$

Высоту параболоида $H_{\text{гор}} = H - z_0$ от его вершины до уровня жидкости, находящейся в цилиндрическом сосуде до вращения сосуда H , определим по зависимости

$$H_{\text{гор}} = \frac{\omega^2 R^2}{4g}. \quad (18)$$

Определение угловой скорости вращения цилиндрического сосуда, вращающегося относительно вертикальной оси. Полагая $z_0 = 0$, т.е. $H_{\text{гор}} = H$, найдем угловую скорость $\omega_{z_0=0}$, при которой свободная поверхность жидкости коснется дна сосуда:

$$\omega_{z_0=0} = 2 \frac{\sqrt{gH}}{R} \quad (19)$$

Угловую скорость ω цилиндрического сосуда по геометрическим размерам параболоида (расположения его вершины относительно основания цилиндра z_0) и высоты уровня жидкости, находящейся в цилиндре до вращения сосуда H , определим по зависимости

$$\omega = 2 \frac{\sqrt{g(H-z_0)}}{R}. \quad (20)$$

Линейная скорость частицы жидкости, находящейся в состоянии относительного покоя во вращающемся сосуде, расположенной на расстоянии радиуса r от оси вращения, принимает значения

$$u = \omega r = 2 \frac{r \sqrt{g(H-z_0)}}{R}. \quad (21)$$

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ (ВИРТУАЛЬНОЙ) УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на компьютере. Виртуальная модель лабораторной установки представлена на рис.4.

Установка состоит из цилиндрического сосуда 1, заполненного водой, двухходовых кранов для добавления жидкости в сосуд 2 и удаления ее из сосуда 3, регулятора частоты вращения сосуда 4, горизонтального 5 и вертикальных измерительных указателей 6 (синего) и 7 (сиреневого), регуляторов измерительных указателей 8-10, измерительных шкал: вертикальной 12 и горизонтальной 13. Вертикальная шкала отсчитывает высоты от верхнего края сосуда.

Для запуска установки нужно задать частоту вращения регулятором 4 или установить флажок 11.

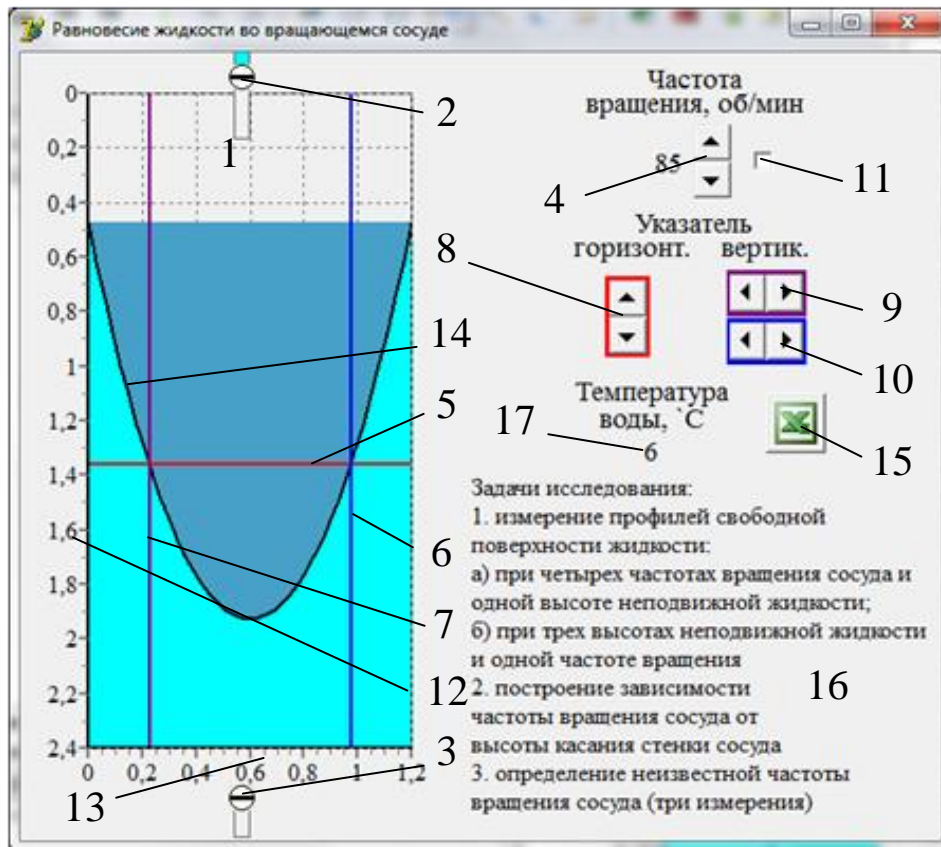


Рис.4. Вид лабораторной установки:

1 – цилиндрический сосуд; 2 и 3 – двухходовые краны; 4 – регулятор частоты вращения; 5 – горизонтальный указатель; 6 и 7 – вертикальные указатели; 8 – регулятор горизонтального указателя; 9 и 10 – регуляторы вертикальных указателей; 11 – флажок для установки произвольной частоты вращения; 12 – вертикальная измерительная шкала; 13 – горизонтальная измерительная шкала; 14 – линия свободной поверхности; 15 – кнопка вывода бланков таблиц в Excel; 16 – задача исследования; 17 – индикатор температуры воды

Определение вертикальной и горизонтальной координат точек свободной поверхности 14 осуществляется при помощи горизонтального 5 и вертикальных указателей 6-7. Для перемещения горизонтального указателя 5 вверх или вниз нужно «нажать» мышкой на верхнюю или нижнюю кнопки регулятора 8 соответственно; для перемещения сиреневого вертикального указателя 6 влево или вправо нужно нажать на левую или правую кнопку регулятора 9 соответственно; для перемещения синего указателя 7 - на кнопки регулятора 10. **Отсчет измеряемых величин производится по вертикальной 12 и горизонтальной 13 шкалам в метрах.**

Для увеличения количества жидкости в сосуде нужно открыть двухходовой кран 2, щелкнув по нему мышкой; для уменьшения количества жидкости в сосуде нужно открыть кран 3. Одновременно открыть оба крана нельзя, также нельзя добавлять и убавлять жидкость при вращении сосуда. Если нужно добавить (удалить) жидкость в сосуд, остановите вращение сосуда регулятором 4 и затем открывайте кран 2 или 3.

При запуске программы размеры сосуда и начальный уровень жидкости в нем определяются случайным образом, поэтому нужно фиксировать размеры установки каждый раз при новом запуске программы.

В окне программы выводится задача исследования 16, которую необходимо переписать в отчет. В окне индикатор 17 показывает температуру воды в сосуде, а кнопка 15 позволяет вывести бланки таблиц отчета в MS Excel.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Основные положения. Обработка результатов

1. Перед началом проведения работы методом измерения определяется уровень горизонтальной поверхности жидкости H от нижней стенки цилиндрического сосуда до начала его вращения (рис. 3).

2. Во время работы при равномерном вращении при заданной угловой скорости жидкость в движущемся сосуде находится в равновесии и движется вместе с сосудом как единое целое (частицы жидкости не перемещаются друг относительно друга), т.е. находится в состоянии относительного покоя.

В моменты равномерного вращения производятся измерения: высоты параболоида $h_{\text{пар(эксп)}}$; координат точек жидкости свободной поверхности по примеру точки $N(z_{\text{св(эксп)}}, r_{\text{св(эксп)}})$ на рис. 3, включая точку вершины параболоида с координатами $(z_{0(\text{эксп})}, r_{\text{св(эксп)}} = 0)$ и точку касания свободной поверхности с внутренней боковой стенкой цилиндра, имеющей координату $(z_{\text{max(эксп)}}, r = R)$.

Для вычисления вертикальной координаты точки свободной поверхности $z_{\text{св}}$ необходимо предварительно определить высоту цилиндрического сосуда h_0 по вертикальной шкале 12 (рис.4), затем измерить y (рис.5) и найти разность этих высот:

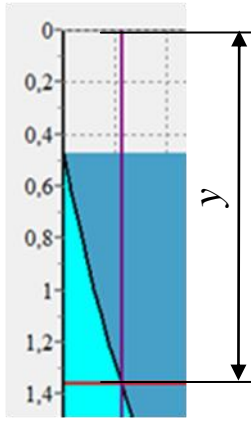


Рис.5. Определение вертикальной координаты точки свободной поверхности

$$z_{\text{св}} = h_0 - y, \quad (22)$$

где $z_{\text{св}}$ – вертикальные координаты точек свободной поверхности жидкости, h_0 – высота цилиндрического сосуда, y – расстояние от верхнего края сосуда до точки свободной поверхности;

расстояние от вертикальной оси (радиус вращения) $r_{\text{св}}$ определяется как разность горизонтальной координаты точки свободной поверхности и горизонтальной координаты вершины параболы, измеренных по шкале 13. В соответствии с рис.6:

$$\begin{aligned} r_{\text{сва}} &= x_a - x_0, \\ r_{\text{свб}} &= x_b - x_0, \end{aligned} \quad (23)$$

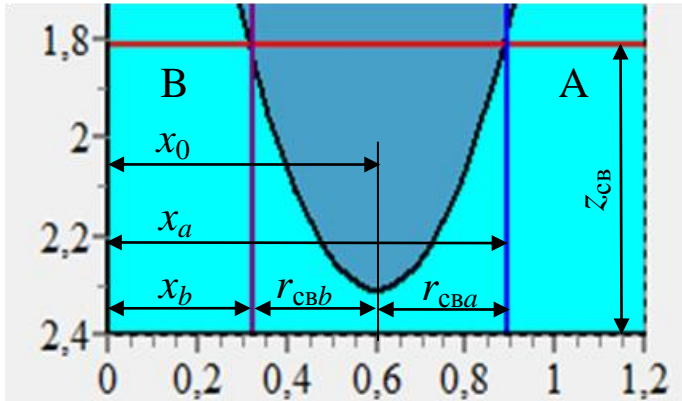


Рис.6. Определение радиусов вращения точек свободной поверхности

где $r_{\text{сва}}$, $r_{\text{свб}}$ – радиусы вращения точек, расположенных на правой и левой ветвях свободной поверхности соответственно; x_0 – горизонтальная координата вершины параболы, измеренная по горизонтальной шкале; x_a и x_b – горизонтальные координаты точек, расположенных на правой и левой ветвях свободной поверхности.

Вершина параболы располагается в центре вращения, поэтому горизонтальная координата вершины параболы x_0 равна радиусу цилиндрического сосуда и уравнения (23) можно записать в виде

$$\begin{aligned} r_{\text{сва}} &= x_a - R = x_a - \frac{D}{2}, \\ r_{\text{свб}} &= x_b - R = x_b - \frac{D}{2}, \end{aligned} \quad (24)$$

где D – диаметр сосуда, м.

При проведении геометрических измерений определяется угловая скорость вращения цилиндрического сосуда $\omega_{\text{эксп}}$ (с^{-1}) по показаниям регулятора частоты вращения $n_{\text{эксп}}$ (об/мин). Зависимость между этими величинами записывается как

$$\omega_{\text{эксп}} = \frac{2\pi n_{\text{эксп}}}{60}. \quad (25)$$

Данные измерений заносятся в таблицу 1 приложения.

3. Координаты точек свободной поверхности при равной с экспериментом скорости вращения цилиндра определяются теоретически следующим образом:

- по зависимости (17) при известном значении H и заданной угловой скорости $\omega_{\text{эксп}}$ определяют ординату $z_{0(\text{теор})}$ вершины параболоида свободной поверхности;
- при той же угловой скорости $\omega_{\text{эксп}}$ и различных значениях r , изменяющихся в пределах от 0 до R , определяют координаты точек свободной поверхности ($z_{\text{св}(\text{теор})}$, r) по зависимости (13).

4. Результаты расчетов сравнивают с экспериментально полученными данными при одной и той же угловой скорости ω в виде графиков зависимости $z_{\text{св}(\text{эксп})} = f(r)$ и $z_{\text{св}(\text{теор})} = f(r)$, построенных на одной диаграмме (пример построения графиков приведен на рис.П1 приложения).

5. Отклонения измеренных экспериментально значений $z_{\text{св}(\text{эксп})}$ от теоретических $z_{\text{св}(\text{теор})}$, рассчитывают по формуле

$$\Delta z = \frac{|z_{\text{св}(\text{теор})} - z_{\text{св}(\text{эксп})}|}{z_{\text{св}(\text{теор})}} \cdot 100, \% \quad (26)$$

и заносят в таблицу 2 приложения.

6. По ординате $z_{0(\text{эксп})}$ при известном значении H рассчитывают теоретическую угловую скорость вращения цилиндрического сосуда $\omega_{\text{теор}}$ по формуле (20):

$$\omega_{\text{теор}} = 2 \sqrt{\frac{g(H - z_{0(\text{эксп})})}{R}}. \quad (27)$$

7. Результаты теоретической угловой скорости вращения цилиндрического сосуда $\omega_{\text{теор}}$ и рассчитанной по частоте вращения угловой скоростью $\omega_{\text{эксп}}$ наносятся на одну диаграмму в виде графиков зависимости $\omega_{\text{эксп}} = f(z_{0(\text{эксп})})$ и $\omega_{\text{теор}} = f(z_{0(\text{эксп})})$ (пример построения графиков приведен на рис.П2 приложения).

8. Отклонения заданных угловых скоростей $\omega_{\text{эксп}}$ по показаниям регулятора частоты вращения, рассчитанных по формуле (25), от $\omega_{\text{теор}}$, рассчитанных по (27), определяют по зависимости (в процентах)

$$\Delta \omega = \frac{|\omega_{\text{теор}} - \omega_{\text{эксп}}|}{\omega_{\text{теор}}} \cdot 100, \% \quad (28)$$

и заносят в таблицу 2 приложения.

9. По полученным геометрическим измерениям свободной поверхности рассчитывают распределение давления воды на дно сосуда p по формуле (9) в зависимости от координаты r , изменяющейся в пределах от 0 до R , для экспериментально измеренных высот $z_{св(эксп)}$

10. Строят график зависимости $p_{вращ} = f(r)$ давления жидкости, покоящейся в равномерно вращающемся сосуде, и график зависимости $p_{неподв} = f(r)$ для жидкости в неподвижном сосуде (пример построения графиков приведен на рис.П3 приложения).

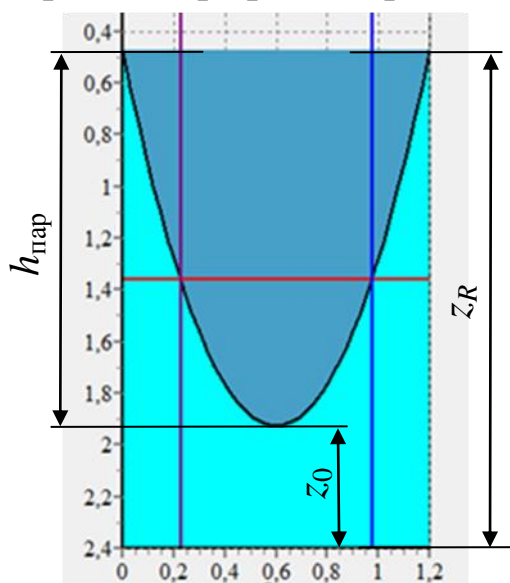


Рис. 7. Характерные высоты параболоида

11. Дают оценку распределения гидростатического давления для обоих случаев.

12. В зависимости от задачи исследования получают зависимость частоты вращения сосуда либо от высоты вершины параболоида z_0 , либо от высоты точки касания стенки сосуда z_R , либо от высоты параболоида $h_{пар}$ (рис.7).

13. По измерениям высот и полученному графику зависимости частоты от заданной высоты (п.12) определяют неизвестные частоты вращения сосуда. Проводят расчет частоты вращения сосуда по уравнениям (1, 6-8), указанным в приложении. По графику также определяют частоту, при которой вершина свободной поверхности коснется дна сосуда.

4.2. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения работы следует изучить теоретические положения и методику проведения работы и обработки результатов опытов.

Необходимо заблаговременно подготовить бланк для записей измеряемых величин по форме таблицы 1 приложения.

Эксперимент проводят в такой последовательности:

1. Запускают приложение «Равновесие жидкости». На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рис.4.

2. Задача исследования выводится в окне программы
3. Определяют уровень жидкости в неподвижном сосуде, значение высоты жидкости записывают в «Журнал наблюдений».
4. Задают число оборотов вращения цилиндрического сосуда с жидкостью при помощи регулятора 4, значение числа оборотов записывают в «Журнал наблюдений».
5. Программа имитирует вращающуюся жидкость в виде параболической воронки свободной поверхности.
6. Производят измерения координат точек свободной поверхности при помощи шкал 12 и 13 и указателей 5-7.
7. Совмещают горизонтальный указатель при помощи регулятора 6 с вершиной параболоида (рис.9) и измерьте ординату вершины свободной поверхности жидкости $z_0(\text{эксп.})$.

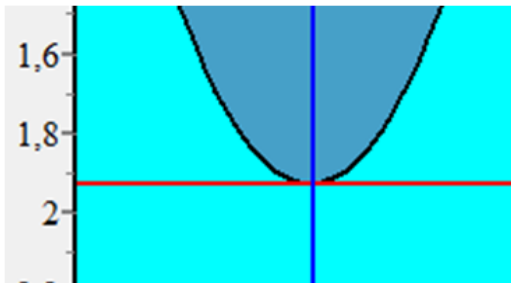


Рис.9. Измерение ординаты точки вершины свободной поверхности жидкости

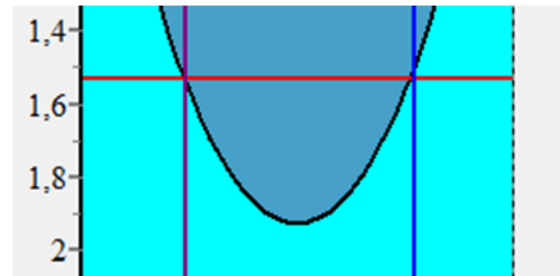


Рис.10. Измерение координат точек свободной поверхности жидкости

8. Перемещают горизонтальный указатель на небольшое расстояние вверх, перемещают вертикальные указатели 4 и 5 при помощи регуляторов 9 и 10 так, чтобы точка пересечения вертикального указателя с горизонтальным совпала с линией свободной поверхности (рис.10).
9. Производят измерения вертикальной и горизонтальной координат точки свободной поверхности, результаты измерений записывают в «Журнал наблюдений».
10. Повторяют измерения точки свободной поверхности с другой стороны линии свободной поверхности при помощи второго вертикального указателя. Запись результатов производят в новую строку.
11. Снова перемещают горизонтальный указатель вверх и повторяют пп.8-10.

12. Производят измерение координат точек касания свободной поверхности с внутренней боковой стенкой цилиндра $z_{R(\text{эксп})}$ (рис.11).

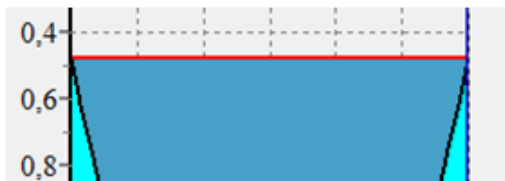


Рис.11. Измерение ординаты точки касания свободной поверхности с внутренней боковой стенкой цилиндра

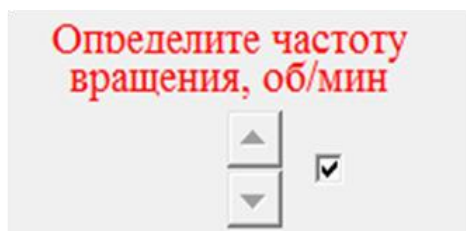


Рис. 8. Установка флажка для определения частоты вращения

13. Изменяют частоту вращения $n_{\text{эксп}}$ и повторяют измерения. Количество измерений координат свободной поверхности производят в соответствии с задачей исследования.

14. Изменяют количество жидкости в сосуде при помощи кранов 2 и 3 (рис.4), измеряют начальный уровень жидкости, устанавливают частоту вращения сосуда, равную одной из ранее установленных частот и производят измерения координат свободной поверхности в соответствии с пп. 7-12.

15. Устанавливают флажок 11 (рис.4), программа автоматически задает частоту вращения сосуда случайным образом, в окне программы выдается запись «Определите частоту вращения» и значение частоты вращения

исчезает. Проводят несколько измерений для определения неизвестных частот вращения.

16. После окончания исследования закрывают программу.

17. Основные формулы для расчета величин приведены в приложении.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах формата А4.

Отчет должен содержать:

- а) титульный лист установленной формы;
- б) краткое изложение теоретических положений;
- в) таблицы «Журнал наблюдений» и «Результаты расчетов»;
- г) обработку результатов исследований:
 - графическое изображение формы свободной поверхности жидкости $z_{\text{св(эксп)}} = f(r)$ и $z_{\text{св(теор)}} = f(r)$;

- графическое изображение форм свободной поверхности жидкости $z_{\text{св(эксп)}} = f(r)$ при разном начальном количестве жидкости;
 - графики зависимости $\omega_{\text{эксп}} = f(z_0)$ и $\omega_{\text{теор}} = f(z_0)$ или графики зависимости $\omega_{\text{эксп}} = f(z_R)$ и $\omega_{\text{теор}} = f(z_R)$ или графики зависимости $\omega_{\text{эксп}} = f(h_{\text{пар}})$ и $\omega_{\text{теор}} = f(h_{\text{пар}})$;
 - графическое изображение распределения давления в жидкости $p = f(r)$, покоящейся в равномерно вращающемся сосуде, и для жидкости в неподвижном сосуде со стенками (глубины погружения исследуемых точек жидкости в обоих случаях одинаковы);
- д) анализ результатов и выводы по работе, которые должны содержать сопоставление результатов исследования и теоретического расчета.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы отличия жидкостей от твердых тел и газов? Как эти отличия связаны с молекулярным строением?
2. В чем заключается гипотеза сплошности жидкости?
3. Что такое плотность жидкости, от чего она зависит и какими единицами измеряется?
4. Какие силы относятся к массовым и поверхностным? Какие виды напряжений действуют в жидкости?
5. Что характерно для сжимаемости жидкостей, как связаны модуль упругости и коэффициент объемного сжатия жидкости?
6. Может ли в покоящейся жидкости проявляться касательное напряжение?
7. Может ли жидкость, например вода, включать в себя воздух? Если может, то подтвердите это положение формулой и количественными данными.
8. В чем заключается аномальное свойство воды?
9. Каковы особенности напряженного состояния покоящейся жидкости?
10. Каковы основные отличительные свойства нормального напряжения поверхностных сил в покоящейся жидкости?
11. Гидростатическое давление – векторная или скалярная величина? Можно ли говорить «давление направлено ...»?

12. В каких единицах измеряется давление? Чему равняется атмосферное давление?
13. Может ли давление в жидкости быть меньше нуля, равно нулю?
14. Что такое поверхность равного давления? Каково ее уравнение?
15. Может ли движущаяся жидкость находиться в равновесии? Если может, при каких условиях?
16. Справедливо ли основное уравнение гидростатики в различных случаях относительного покоя?
17. Записать формулу для силы давления покоящейся жидкости на плоские поверхности. Почему в большинстве случаев необходимо знать силу избыточного гидростатического давления?
18. Физические свойства жидкости и единицы их измерения в системе СИ.
19. Дать определение относительного покоя жидкости, привести примеры подобного состояния.
20. Вывести основное уравнение гидростатики.
21. Энергетический смысл основного уравнения гидростатики.
22. Закон Паскаля.
23. Каким образом можно использовать открытый сосуд, заполненный жидкостью и вращающийся вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью, в качестве прибора, служащего для определения числа оборотов вала (жидкостный тахометр)?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для студентов химико-технологических специальностей вузов / А. Г. Касаткин. – Москва : Альянс , 2014. – 752 с.
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика : учебник [для студентов всех форм обучения групп направлений подготовки "Машиностроение", "Науки о земле", "Техника и технологии строительства", "Техносферная безопасность и природообустройство"] / Д. В. Штеренлихт. - Санкт-Петербург : Лань , 2015. – 656 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности 010500 "Механика" / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа , 2003. – 840 с.

Таблица 1

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Температура воды, °С				
Диаметр сосуда, мм				
Высота сосуда, мм				
№ п/п	Высота неподвижной жидкости в сосуде, мм	Частота вращения сосуда $n_{\text{эксп}}$, об/мин	Координаты точек свободной поверхности жидкости, мм	
			ордината	абсцисса

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

№ п/п	Угловая скорость вращения ω , с ⁻¹		Отклонение экспериментальной угловой скорости от теоретической $\Delta\omega$, %	Координата свободной поверхности по радиусу цилиндра $r_{\text{эксп}}$, мм	Координата свободной поверхности по вертикальной оси $z_{\text{св}}$, мм		Отклонение формы свободной поверхности по вертикальной координате Δz , %	Давление жидкости на дно сосуда $P_{\text{вращ}}$, Па
	Экспериментальная	Теоретическая			Экспериментальная	Теоретическая		

Таблица 3

РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СОСУДА

№ п/п	Высота неподвижной жидкости, мм	Высота вершины свободной поверхности*, мм	Высота свободной поверхности*, мм	Высота касания стенки свободной поверхностью*, мм	Частота вращения сосуда $n_{\text{эксп}}$, об/мин	Расчет частоты вращения сосуда, об/мин
----------	---------------------------------	---	-----------------------------------	---	--	--

* заполняется в соответствии с задачей исследования

Таблица 3

Значения плотности воды при нормальном атмосферном давлении и различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,87	999,97	1000	999,97	999,88
$t, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,7	999,2	998,3	997,1	995,7

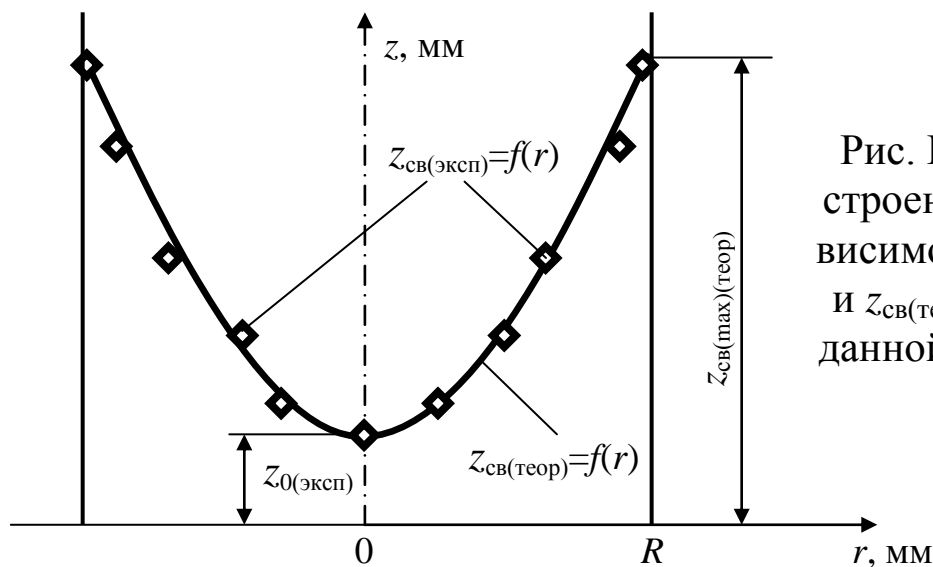


Рис. П1. Пример построения графиков зависимости $z_{\text{св(эксп)}} = f(r)$ и $z_{\text{св(теор)}} = f(r)$ при заданной угловой скорости $\omega_{\text{эксп}}$

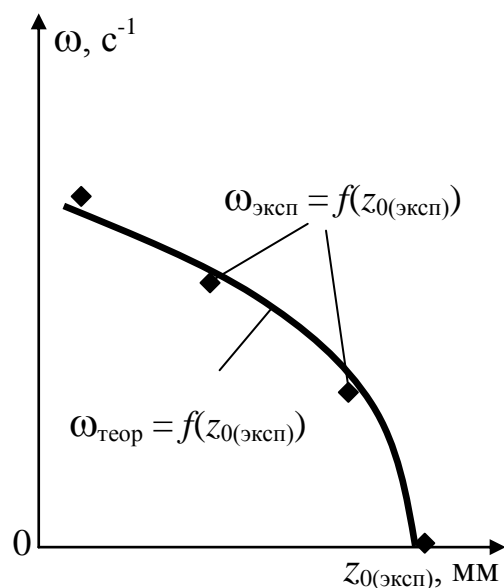


Рис. П2. Пример построения графика зависимости угловой скорости вращения цилиндрического сосуда ω от координаты вершины параболоида z_0

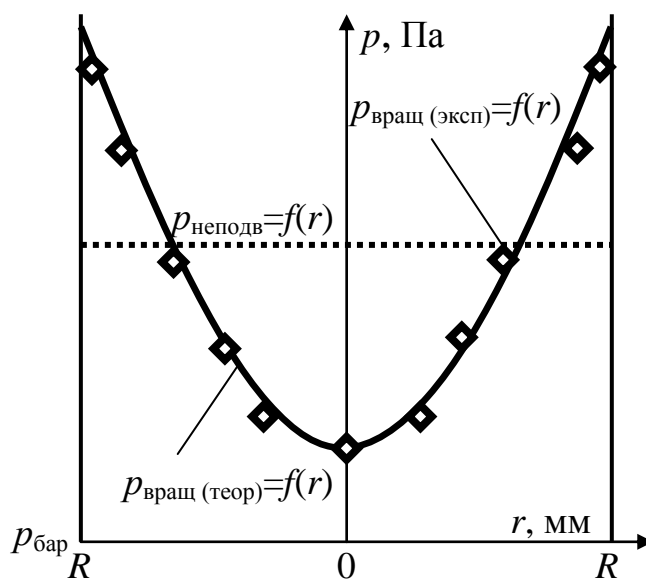


Рис. П3. Пример построения графика зависимости гидростатического давления p на дно в неподвижном и во вращающемся сосуде

Основные формулы для расчета величин

1. Определение экспериментальной угловой скорости вращения цилиндрического сосуда по (25):

$$\omega_{\text{эксп}} = \frac{2\pi n_{\text{эксп}}}{60}.$$

2. Определение теоретической угловой скорости вращения цилиндрического сосуда по (27):

$$\omega_{\text{теор}} = 2 \sqrt{\frac{g(H - z_0(\text{эксп}))}{R}}.$$

3. Отклонение экспериментальной угловой скорости от теоретической по (28):

$$\Delta\omega = \frac{|\omega_{\text{теор}} - \omega_{\text{эксп}}|}{\omega_{\text{теор}}} \cdot 100.$$

4. Определение теоретической координаты свободной поверхности по вертикальной оси по (13):

$$z_{\text{св(теор)}} = z_0(\text{эксп}) + \frac{\omega_{\text{теор}}^2 r_{\text{эксп}}^2}{2g}.$$

5. Отклонение экспериментальной формы свободной поверхности от теоретической по вертикальной координате согласно (26):

$$\Delta z = \frac{|z_{\text{св(теор)}} - z_{\text{св(эксп)}}|}{z_{\text{св(теор)}}} \cdot 100.$$

6. Высота вершины параболоида согласно (17):

$$z_0 = H - \frac{\omega^2 R^2}{4g} = H - \frac{\omega^2 D^2}{16g}.$$

7. Высота свободной поверхности (высота параболоида) по (16):

$$h_{\text{пар}} = \frac{\omega^2 R^2}{2g} = \frac{\omega^2 D^2}{8g}.$$

8. Высота точки касания стенки свободной поверхностью:

$$z_R = z_0 + h_{\text{пар}} = H - \frac{\omega^2 R^2}{4g} + \frac{\omega^2 R^2}{2g} = H + \frac{\omega^2 R^2}{4g} = H + \frac{\omega^2 D^2}{16g}.$$

9. Определение давления жидкости на дно вдоль плоскости радиальной координаты r в пределах от 0 до R для сосуда, вращающегося вокруг вертикальной оси с жидкостью (в качестве примера взять воду) при заданной скорости $\omega_{\text{эксп}}$, по зависимости

$$p_{\text{вращ}} = \rho g h,$$

где h – глубина погружения точки дна под свободной поверхностью, т. е. измеренное по вертикали расстояние от свободной до рассматриваемой точки дна сосуда.