

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 532.11; 532.25; 532.516

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-258-264>

Поступило в редакцию 20.10.2025

Received 20.10.2025

В. Д. Тютюма

*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
ул. Академическая, 15/2, 220072, Минск, Республика Беларусь*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

(Представлено академиком А. А. Михалевичем)

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования по стратификации давления в вертикальном закрученном водном потоке под действием силы тяжести. Целью эксперимента является уточнение механизма формирования давления в сдвиговых потоках вязкой сжимаемой жидкости. В рамках существующих представлений на развитие тепловых и гидродинамических процессов, основанных на уравнении Навье–Стокса, не существует различий в формировании давления под действием внешних массовых сил в движущейся и неподвижной среде. Если же исходить из концепции фононного механизма переноса импульса, то проявление массовых сил будет различным в движущейся и неподвижной жидкости. В этом случае в сдвиговом потоке под действием силы тяжести давление и плотность с увеличением глубины нарастает сильнее, чем в покоящейся водной среде. В работе дается теоретическое обоснование эксперимента, методика его проведения и рассматривается схема экспериментальной установки. В результате исследований получены экспериментальные данные, которые подтвердили фононный механизм формирования давления под действием силы тяжести в водном концентрированном вихре с вертикальной осью вращения.

Ключевые слова: стратификация давления, гравитационная сила, гидростатическое равновесие, течение вязкой сжимаемой жидкости, фононный механизм переноса импульса

Для цитирования. Тютюма, В. Д. Экспериментальные исследования стратификации давления в закрученном потоке под действием силы тяжести / В. Д. Тютюма // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 3. – С. 258–264. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-258-264>

Vladimir D. Tyutyuma

*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
15/2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

EXPERIMENTAL STUDIES OF PRESSURE STRATIFICATION IN A ROTATING FLOW UNDER GRAVITY

(Communicated by Academician Aliaksandr A. Mikhalevich)

Abstract. Experimental studies of pressure stratification in a vertical swirling water flow under the action of gravity were conducted. The aim of the experiment was to clarify the mechanism of pressure formation in shear flows of a viscous compressible fluid. Within the framework of existing concepts of the development of thermal and hydrodynamic processes based on the Navier–Stokes equations, there are no differences in pressure formation under the action of external mass forces in a moving and stationary medium. However, within the framework of concept of the phonon mechanism of momentum transfer, the effect of body forces differs in a moving and stationary liquid. In this case, pressure and density in a shear flow under gravity would increase more rapidly with increasing depth than in a stationary aquatic environment. This paper provides a theoretical justification for the experiment and describes the layout of the experimental setup and methodology. The results of the study confirmed the phonon mechanism of pressure formation under gravity in an intense water vortex with a vertical axis of rotation.

Keywords: pressure stratification, gravitational force, hydrostatic equilibrium, flow of viscous compressible fluid, phonon mechanism of momentum transfer

For citation. Tyutyuma V. D. Experimental studies of pressure stratification in a rotating flow under gravit. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 3, pp. 258–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-258-264>

Введение. Структура потока вязкой сжимаемой жидкости формируется в результате взаимного влияния механических, тепловых и акустических процессов, которые в совокупности и определяют все многообразие наблюдаемых тепловых и гидродинамических явлений. Однако в рамках существующих представлений влияние акустики на формирование тепловых и гидродинамических параметров течения не принимают во внимание. Хотя теоретические и экспериментальные исследования в газовой динамике идеального газа убедительно демонстрируют тот факт, что малые возмущения давления в потоке сжимаемой жидкости переносятся звуковыми волнами относительно движущейся среды с адиабатической скоростью звука [1–3]. Этот результат имеет особое значение для гидродинамики, так как представляет собой физически обоснованный и экспериментально выверенный принцип калибровки процессов тепломассообмена. Для построения теории течения вязкой сжимаемой жидкости это положение имеет такое же фундаментальное значение, как и сами законы сохранения. Перенос импульса звуковыми волнами дополнительно к равновесному термодинамическому давлению генерирует в движущемся потоке звуковое (фононное) давление, которое подчинено своим особым закономерностям развития. Тем самым состояние сдвигового течения существенно отличается от состояния статического равновесия, где фононное давление отсутствует. Прежде всего это относится к уравнению состояния и поверхностным силам, которые существенно отличаются в неподвижной и движущейся жидкости. В силу особого значения этого положения не только в плане построения теории, но и для практического применения, возникает необходимость в его экспериментальной проверке. В настоящей работе рассматривается методика постановки такого эксперимента, обсуждается принципиальная схема экспериментальной установки и приводятся результаты экспериментальных исследований.

Теоретическое обоснование постановки эксперимента. Для экспериментальной проверки действия поверхностных сил в потоке и в неподвижной жидкости рассмотрим равновесие в поле силы тяжести покоящейся водной среды и сдвигового водного потока, движущегося в горизонтальной плоскости перпендикулярно земному ускорению.

Условие статического равновесия жидкостей и газов во внешнем гравитационном поле определяется уравнением гидростатики, которое при направленной вниз оси oz имеет вид [1]

$$\frac{dp}{dz} = \rho g. \quad (1)$$

При небольших перепадах давления водную среду можно считать несжимаемой. Для несжимаемой жидкости при $\rho = \text{const}$ из уравнения (1) для изменения давления с глубиной получим

$$p = p_0 + \rho g(z - z_0) = p_0 + \rho gh, \quad (2)$$

где p_0 – давление над свободной поверхностью жидкости; z – глубина, отсчитываемая вниз от свободной поверхности $z = z_0$. Таким образом, в неподвижной жидкости перепад давлений в точках, расположенных на глубине z от свободной поверхности, равен весу столба жидкости с единичной площадью основания и высотой $h = z - z_0$.

В качестве сдвигового потока рассмотрим в поле тяжести вихрь с вертикальной осью вращения. Если в таком вихревом образовании вертикальное течение незначительно, то проекция уравнения движения на данное направление в пренебрежении вертикальной составляющей скорости вырождается в уравнение равновесия движущейся жидкости во внешнем гравитационном поле.

Для модели течения, основанной на уравнении Навье–Стокса, условие равновесия жидкости вихревого образования в поле силы тяжести описывается теми же уравнениями гидростатики (1) и (2). Поэтому не существует никаких различий в формировании давления по вертикали в неподвижной жидкости и концентрированном вихре. При постоянной температуре перепады давления и плотности в точках, расположенных на глубине z , от свободной поверхности в вихревом образовании и неподвижной жидкости будут равны, и при одинаковой массе объема, занимаемые жидкостью, в неподвижной и движущейся среде будут совпадать. Этот результат имеет принципиальное значение, так как по указанным признакам позволяет экспериментально подтвердить факт гидростатического механизма формирования давления в поле тяжести в закрученном потоке в соответствии с уравнением Навье–Стокса.

Для модели течения, учитывающей фононный механизм переноса импульса, уравнение движения в гравитационном поле вязкой сжимаемой жидкости записывается в виде [4]

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \bar{V} \right) = -c^2 \nabla \rho + \eta \Delta \bar{V} + \frac{1}{3} \eta \nabla (\nabla \bar{V}) + \rho \bar{g}.$$

Отличие этого уравнения от уравнения Навье–Стокса заключается в том, что объемное действие поверхностных сил в нем выражается не через градиент давления, а через градиент плотности. При этом уравнение состояния в сдвиговом потоке отличается от уравнения состояния в неподвижной жидкости, а термодинамический процесс переноса импульса не связан с термодинамическим процессом переноса энергии. Если в этом уравнении положить вертикальную составляющую скорости, равной нулю, то условие равновесия вращающейся в зоне вихря среды в поле силы тяжести будет описываться уравнением

$$c^2 \frac{\partial \rho}{\partial z} = \rho g. \quad (3)$$

Интегрируя соотношение (3), получим

$$\rho(z) = \rho_0 \exp \left(\int_{z_0}^z \frac{g dz}{c^2(z)} \right), \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность жидкости на свободной поверхности $z = z_0$. Эта формула при известной по высоте скорости звука в вихре позволяет определить стратификацию по вертикали плотности вращающейся среды.

Распределение давления с высотой определяется из уравнения состояния, которое при учете фононного механизма переноса импульса записывается в виде [4]

$$p = \rho c^2 + p_f(c), \quad (5)$$

где $p_f(c)$ – функция, зависящая от скорости звука, вид которой определяется термодинамическими свойствами жидкости.

Если $p_f(c)$ установлена, то подставив (4) в (5) для распределения с глубиной давления получим выражение

$$p(z) = c(z)^2 \rho_0 \exp \left(\int_{z_0}^z \frac{g dz}{c^2(z)} \right) + p_f(c(z)). \quad (6)$$

Соотношение (6) для стратификации давления в зоне вихря существенно отличается от формулы (2), описывающей гидростатическое равновесие жидкости в неподвижной среде. Проведенные в [4] расчеты по соотношениям (3)–(6) для изотермической водной среды показали, что давление и плотность с увеличением глубины нарастают в вихре сильнее, чем в неподвижной жидкости. Следовательно, при одинаковом перепаде давлений гидростатические столбы в зоне вихря и покоящейся жидкости будут различными. В неподвижной среде пьезометрическая высота будет выше, а объем, занимаемый жидкостью, больше, чем в закрученном потоке. Если это условие выполняется, то можно утверждать, что в зоне вихревого образования давление формируется в результате фононного механизма переноса импульса.

Таким образом, существует возможность опытным путем из двух взаимоисключающих вариантов распределения давления в зоне вихря определить тот единственный случай, который на самом деле реализуется в натурных условиях. Так как фононный механизм формирования структуры течения нашел убедительное экспериментальное подтверждение результатами измерения распределения параметров течения в различного рода закрученных потоках [4], то с большой долей вероятности можно предположить, что стратификация давления в вихревых образованиях в поле силы тяжести будет описываться именно этой моделью течения.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она включает в себя прозрачную вихревую трубу 1 высотой 2 м с наружным диаметром 110 мм и внутренним диаметром 104 мм. Высота вихревой трубы за счет дополнительных непрозрачных вставок может увеличиваться. Вихревая

труба через дренажное отверстие 6 соединена с прозрачной трубкой статического давления 2 внутренним диаметром 4 мм, которая совместно с вихревой трубой образуют между собой сообщающиеся сосуды. На верхнем торце вихревой трубы посредством фланца 3 закреплен электродвигатель постоянного тока 4, который с помощью вала 7 длиной 985 мм приводит во вращение завихритель 5 диаметром 51 мм с четырьмя лопатками высотой 40 мм. Питание электродвигателя осуществляется от источника питания постоянного тока 8, позволяющего регулировать напряжение электрического тока от 0 до 60 В при токе нагрузки до 5 А. При этом скорость вращения завихрителя может регулироваться в пределах от 0 до 2000 об/мин. Для регистрации скорости вращения использовался цифровой стробоскопический тахометр Testo-465 с диапазоном измерений от 1 до 100000 об/мин, систематическая погрешность которого составляет $\pm 0,02\%$ от измеренного значения.

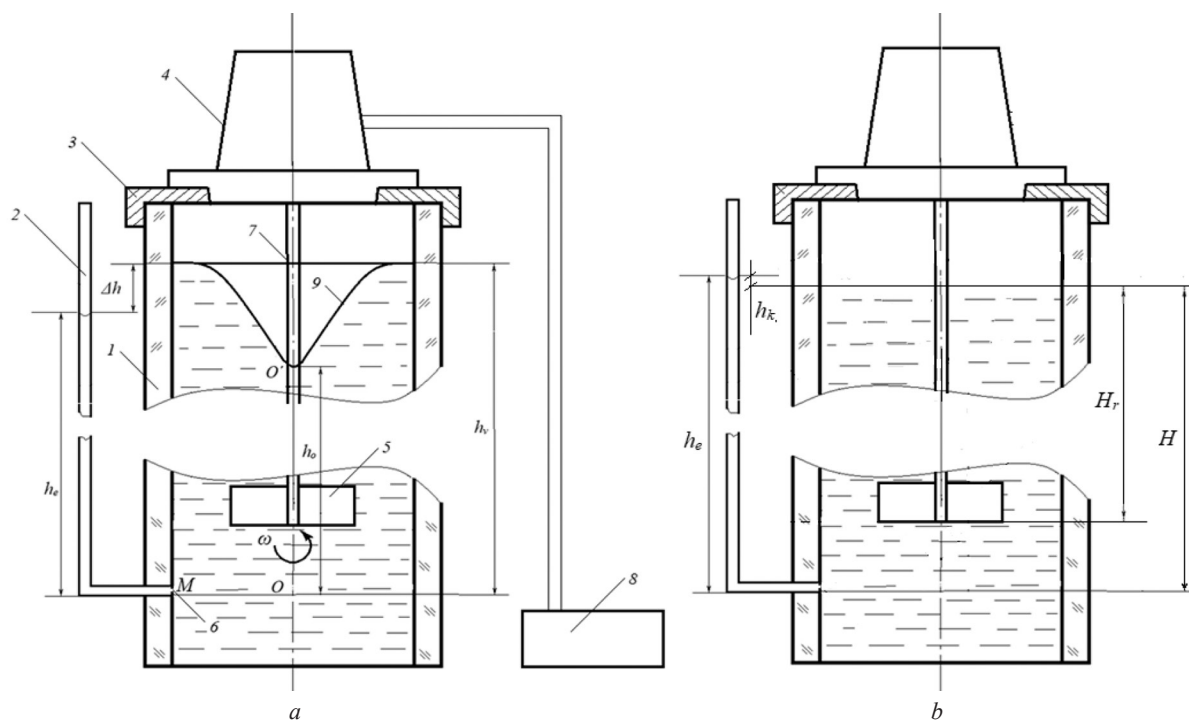


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а – в динамике; б – в статике

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: а – in dynamics; б – in statics

Эксперимент проводился в следующей последовательности. Вихревая труба заполнялась водопроводной водой (рис. 1, б) до уровня, соответствующего фиксированной высоте неподвижной жидкости H . При этом в трубке статического давления устанавливался вертикальный столб жидкости h_e , высота которого превышала H на высоту поднятия жидкости h_k в трубке статического давления за счет капиллярного эффекта, а сам завихритель погружался в воду на глубину H_r . Параметры H , H_r и h_k фиксировались. Следует отметить, что высота поднятия жидкости h_k в трубке статического давления за счет капиллярного эффекта не сохранялась постоянной, а от опыта к опыту изменялась в диапазоне 2,0–5,0 мм. Затем на электродвигатель подавалось определенное фиксированное напряжение электрического тока. В результате вращения крыльчатки завихрителя в вихревой трубе формировался вихрь, интенсивность которого зависела от скорости вращения крыльчатки. После выхода водяного вихря на установившийся режим (рис. 1, а) измерялись столбы жидкости в трубке статического давления h_e и в пограничной пристенной зоне вихревой трубы h_v , а также фиксировалась их разность высот Δh , которая вычислялась с учетом капиллярного эффекта по формуле

$$\Delta h = h_v - h_e + h_k.$$

Измерение разности уровней высот производилось штангенциркулем с систематической погрешностью 0,1 мм. Случайная ошибка измерения за счет мениска и колебаний уровня вращающейся жидкости в вихревой трубе не превышала 0,5 мм. Для измеренного значения Δh с помощью цифрового стробоскопического тахометра Testo-465 определялась скорость вращения крыльчатки завихрителя. Затем напряжение тока увеличивалось и все указанные выше измерения проводились при новом значении напряжения электрического тока. Эта последовательность измерений осуществлялась до тех пор, пока разность высот столбов жидкости не вышла на установившийся режим. Аналогично измерения проводились при другой высоте водяного столба H .

Результаты и их обсуждение. При вращении жидкости в верхней части вихревой трубы образуется вихревая воронка (рис. 2), которая по форме и по динамике развития во многом подобна вихревым воронкам, возникающим при вытекании воды через отверстие в дне сосуда [5]. С увеличением скорости вращения вихря воздушная полость воронки удлиняется. При фиксированной скорости вращения воздушная полость удлиняется также с уменьшением глубины погружения завихрителя H_r .

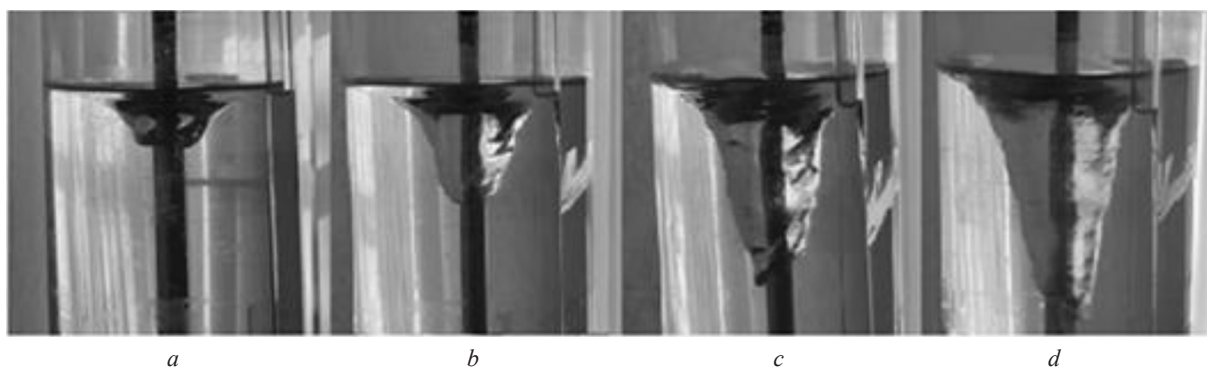


Рис. 2. Формы вихревых воронок при различных значениях угловых скоростей вращения завихрителя ($H = 1950$ мм; $H_r = 935$ мм): $a - \omega = 48$ с⁻¹; $b - 54$ с⁻¹; $c - 68$ с⁻¹; $d - 80$ с⁻¹

Fig. 2. Shapes of vortex funnels at different values of angular velocities of rotation of the swirler ($H = 1950$ mm; $H_r = 935$ mm): $a - \omega = 48$ с⁻¹; $b - 54$ с⁻¹; $c - 68$ с⁻¹; $d - 80$ с⁻¹

Экспериментальные кривые перепадов высот Δh в зависимости от угловой скорости вращения завихрителя ω для различных значений уровней заполнения водой вихревой трубы H приведены на рис. 3. Всего было проведено три серии измерений для уровней заполнения вихревой трубы H : 1950, 2970 и 3950 мм. При этом глубина погружения завихрителя H_r поддерживалась постоянной, равной 935 мм. Проведенные эксперименты показывают, что уровни высот гидростатических столбов в пограничном слое вихря и покоящейся жидкости при одинаковом перепаде давлений не совпадают. Как видно из представленных графиков, с увеличением угловой скорости перепады высот при небольших скоростях нарастают преимущественно по квадратичной зависимости. Когда угловая скорость достигает значения, при котором вихрь сформирован и занимает все пространство вихревой трубы, кривая резко переходит на горизонтальный участок, где Δh практически сохраняет постоянное значение. Увеличение перепадов высот противоречит полученным в [4] теоретическим выводам по оценке стратификации давления в вихревом образовании под действием силы тяжести, согласно которым высота столба жидкости в вихре должна быть ниже гидростатической высоты в неподвижной жидкости. Такое расхождение теории с экспериментом объясняется тем, что помимо силы тяжести на распределение давления в вихревой трубе оказывают влияние термодинамические эффекты, а также возмущающее действие на параметры потока вращающегося завихрителя.

С увеличением высоты столба жидкости H перепады высот Δh уменьшаются по линейной зависимости, как это показано на рис. 4. Здесь линия I относится к максимальным значениям перепадов высот $\Delta h_{\max}$. Пунктирный участок линии соответствует линейной экстраполяции графика в направлении малых значений H . Так как опыты проводились при одной и той же глубине погружения завихрителя H_r , то можно предположить, что его возмущающее действие на высоту поднятия

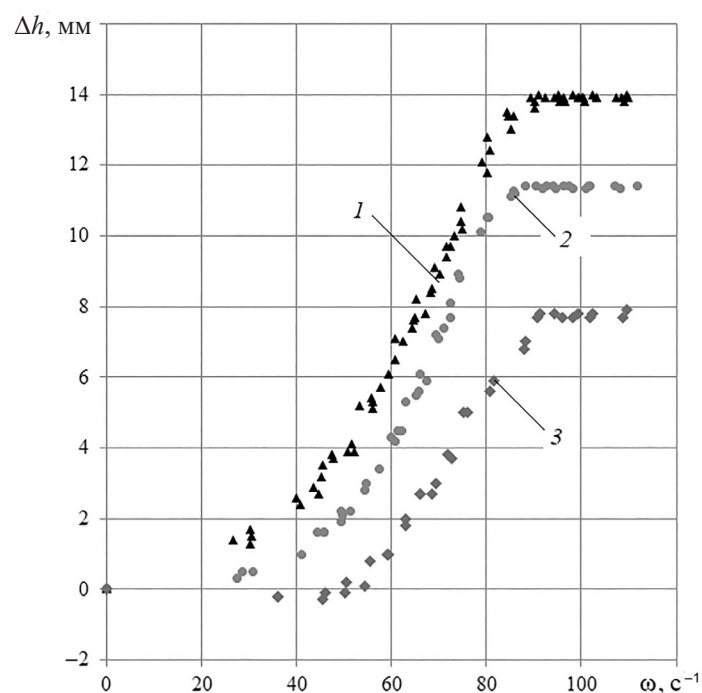


Рис. 3. Зависимость разности перепадов высот столбов жидкости в трубе статического давления и в пристенной зоне пограничного слоя вихревой трубы при $H_r = 935$ мм от угловой скорости вращения завихрителя для различных уровней заполнения H : 1 – $H = 1950$ мм; 2 – 2970 мм; 3 – 3950 мм

Fig. 3. Dependence of the difference in the height differences of the liquid columns in the static pressure tube and in the wall zone of the boundary layer of the vortex tube at $H_r = 935$ mm on the angular velocity of rotation of the swirler for different filling levels H ; 1 – $H = 1950$ mm; 2 – 2970 mm; 3 – 3950 mm

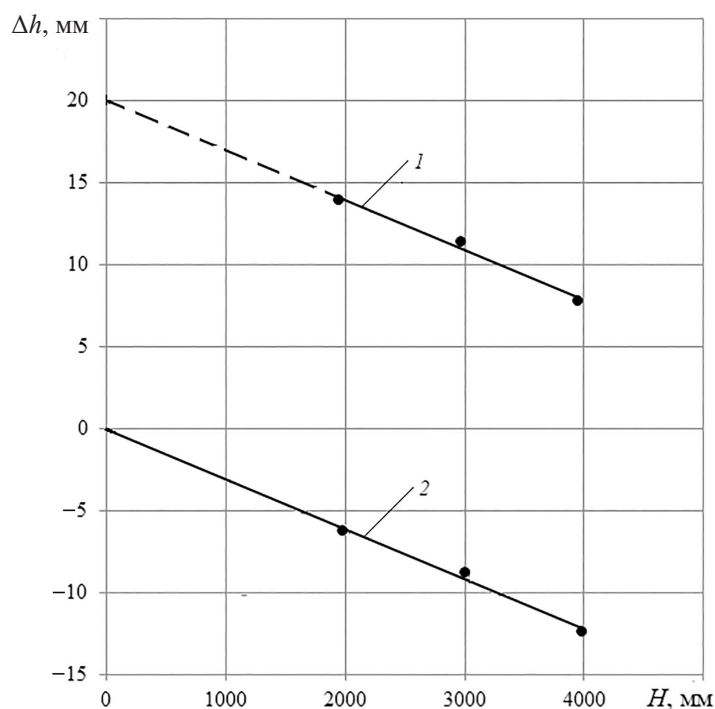


Рис. 4. Зависимость разности перепадов высот гидростатических столбов водной среды от уровня заполнения трубы: 1 – максимальные значения; 2 – разности перепадов высот за счет силы тяжести

Fig. 4. Dependence of the difference in the height differences of the hydrostatic columns of the water environment on the filling level of the pipe: 1 – maximum values; 2 – differences in height differences due to gravity

жидкости в вихревой трубе одинаково для всех уровней заполнения вихревой трубы H . Поэтому сместив график I в начало координат получим прямую линию 2, описывающую зависимость перепада высот Δh от H , порождаемую силой тяжести. Как видно, с увеличением уровня заполнения пьезометрическая высота в вихре уменьшается по сравнению с высотой гидростатического столба неподвижной жидкости, что качественно согласуется с теоретическими выводами, полученными в [4].

Совершенно неожиданным оказался результат, заключающийся в том, что первоначальная высота столба жидкости в трубке статического давления h_e с увеличением скорости вращения завихрителя практически не изменяется. Следовательно, сохраняется и первоначальная масса жидкости в вихревой трубе. Так как под действием силы тяжести высота столба жидкости в вихре ниже высоты жидкости в трубке статического давления, то в силу постоянства площади поперечного сечения вихревой трубы занимаемый жидкостью объем в вихре будет меньше объема в неподвижном состоянии. Уменьшение объема жидкости в закрученном потоке убедительно демонстрируют и фотографии воронок на рис. 2, где отчетливо видно, что приращение объема воздушной полости воронки по объему больше приращения объема за счет поднятия уровня жидкости в вихревой трубе.

Заключение. Проведены экспериментальные исследования по стратификации давления под действием силы тяжести в водном закрученном потоке с вертикальной осью вращения. Полученные экспериментальные данные подтвердили различие в изменении давления с глубиной в вихревом образовании и покоящейся среде. В соответствии с теоретическими выводами, основанными на модели течения в приближении фононного механизма переноса импульса, с увеличением глубины давление и плотность во вращающемся потоке нарастают более интенсивно чем в неподвижной жидкости.

Список использованных источников

1. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М., 1970. – 904 с.
2. Черный, Г. Г. Газовая динамика / Г. Г. Черный. – М., 1988. – 424 с.
3. Липман, Г. В. Элементы газовой динамики / Г. В. Липман, А. Рошко. – М., 1960. – 518 с.
4. Тютюма, В. Д. Течение вязкой сжимаемой жидкости. Концепция фононного переноса импульса / В. Д. Тютюма. – Мн., 2024. – 263 с.
5. Meshkov, E. E. Bath-tub vortex attenuation with the increase of in-vessel water level / E. E. Meshkov, A. A. Sirotkin // *Physica Scripta*. – 2013. – Vol. 2013, N T155. – Art. 014058. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2013/t155/014058>

References

1. Loitsyanskii L. G. *Mechanics of Liquids and Gases*. Moscow, 1970. 904 p. (in Russian).
2. Cherny G. G. *Gas Dynamics*. Moscow, 1988. 424 p. (in Russian).
3. Lipman G. V., Roshko A. *Elements of Gasdynamics*. New York, 1957.
4. Tyutyuma V. D. *Flow of a Viscous Compressible Fluid. The Concept of Phonon Momentum Transfer*. Minsk, 2024. 263 p. (in Russian).
5. Meshkov E. E., Sirotkin A. A. Bath-tub vortex attenuation with the increase of in-vessel water level. *Physica Scripta*, 2013, vol. 2013, no. T155, art. 014058. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2013/t155/014058>

Информация об авторе

Тютюма Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. E-mail: tvd@hmti.ac.by.

Information about the authors

Tyutyuma Vladimir D. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. E-mail: tvd@hmti.ac.by.