

EDN: LIWORS

УДК 620.92

Methods and Means of Determination Dynamic Strength of Water

Alexandr Yu. Radzyuk*,
Elena B. Istyagina, Vladimir A. Kulagin,
Tatiana A. Pyanykh and Denis A. Grishaev
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.01.2023, received in revised form 03.02.2023, accepted 13.03.2023

Abstract. This paper presents the results of studies to determine the cavitation strength of water. It is proposed to use the change in the dependence of the shear rate on shear stresses as a criterion for determining the moment of transition from a continuous flow to a cavitation one. To process the experimental results, numerical calculations were carried out using the method of local polynomial regression. Data processing by approximation methods made it possible to demonstrate that the coefficient of dynamic viscosity of water, which is a constant at a constant temperature in the region of a single-phase flow, decreases at the onset of flow discontinuity, i.e., cavitation processes in the liquid.

Keywords: cavitation, dynamic strength of water, methods for determining the strength of water.

Citation: Radzyuk, A. Yu., Istyagina, E.B., Kulagin, V.A., Pyanykh, T.A., Grishaev, D. A. Methods and means of determination dynamic strength of water. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(3), 258–271. EDN: LIWORS



Методы и средства определения динамической прочности воды

А. Ю. Радзюк, Е. Б. Истягина,
В. А. Кулагин, Т. А. Пьяных, Д. А. Гришаев
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследований с целью определения кавитационной прочности воды. Предложено использовать изменение зависимости скорости сдвига от сдвигающих напряжений в качестве критерия, позволяющего определить момент перехода от сплошного потока к кавитационному. Для обработки экспериментальных результатов проведены численные расчеты с использованием метода локальной полиномиальной регрессии. Обработка данных методами аппроксимации позволила продемонстрировать, что коэффициент динамической вязкости воды, в области однофазного течения являющийся константой при постоянной температуре, снижается при начале нарушения сплошности потока, т.е. кавитационных процессах в жидкости.

Ключевые слова: кавитация, динамическая прочность воды, методы определения прочности воды.

Цитирование: Радзюк А. Ю. Методы и средства определения динамической прочности воды / А. Ю. Радзюк., Е. Б. Истягина, В. А. Кулагин, Т. А. Пьяных, Д. А. Гришаев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(3). С. 258–271. EDN: LIWORS

Введение

Все более широкое применение кавитационных эффектов в различных областях сопровождается их аналитическим и экспериментальным изучением. Методы, используемые для регистрации разрыва сплошности потока при кавитации, следующие:

- визуальные методы наблюдения, включая высокоскоростную съемку;
- гидравлические методы, основанные на изменении параметров потока (расхода, скорости, перепада давлений, гидродинамических усилий и т.п.);
- акустические методы;
- электрические (омические, электроемкостные);
- химические
- радиоактивные.

Часто при исследовании используют одновременно несколько методов.

Один из простых и нашедших широкое распространение методов определения растягивающих напряжений относится к XIX в. и принадлежит одному из родоначальников гидродинамики Осборну Рейнольдсу. Метод заключается в следующем: короткую трубку (чаще капилляр) с загнутыми и открытыми концами заполняют исследуемой жидкостью и приводят во вращение в горизонтальной плоскости. В результате плавного увеличения скорости вращения жидкость разрывается под действием возрастающих центробежных сил. Разрыв происходит на оси вращения и регистрируется при помощи специального датчика. Прочность жидкости, определяемая в терминах отрицательного давления ($-p$) или растягивающего напряжения (Z), при

котором начинается выделение парогазовых пузырьков и жидкость теряет свою сплошность, определяется по известной формуле:

$$-p = Z = p_0 - \rho\Omega^2 r^2/2, \quad (1)$$

где p_0 – давление вне капилляра; ρ – плотность; Ω – угловая скорость вращения в момент разрыва; r – радиус капилляра.

Несмотря на очевидность и доступность метода, полученные таким образом величины прочности жидкостей имеют большой разброс значений, что связано с трудностью обеспечения чистоты поверхности, с которой соприкасается исследуемый образец жидкости.

За прошедшие со времен опытов Рейнольдса полтора столетия задача об окончательном определении прочности жидкости так и не решена. Это связано как с ее сложностью, так и с определяющим влиянием самого опыта на получаемый результат. Далее остановимся только на наиболее актуальных исследованиях в данной области.

Обзор используемых методов

Большинство исследователей, рассматривающих эту проблему, выбирают экспериментальные методы. Экспериментальные исследования различаются в своих выводах о значении прочности воды на разрыв, разница обычно объясняется наличием примесей в воде. В работе [1] исследовалась прочность на растяжение, измеренная различными методами, сравнивалась с теоретическим абсолютным метастабильным пределом. В результате работы авторы пришли к выводу, что значения предела прочности при растяжении зависят от условий эксперимента, которые определяют значения скорости образования зародышей, именно поэтому значения предела прочности для одних и тех же веществ, полученные разными исследователями, существенно отличаются друг от друга. Анализ репрезентативной выборки экспериментальных исследований возникновения кавитации и прочности воды на разрыв проведен в [2]. Отсутствие или наличие загрязнений на поверхностях, а также структура поверхностей играют центральную роль в объяснении того, почему прочность воды на разрыв так сильно варьируется в зависимости от описанных экспериментов. Авторами представлена модель для расчета критического давления пузырьков свободного газа, покрытых оболочкой, а также межфазных газовых ядер, покрытых оболочкой, способная объединить противоречивые результаты многих исследователей.

В качестве объекта исследования часто выбирается вода, жидкость, которой экспериментально уделяется наибольшее внимание [3, 4]. Механика процесса разрушения жидкости при взрывном нагружении рассматривается в работе [5]. Процесс разрушения жидкости трактуется как инверсия двухфазного состояния среды, включающая формирование пузырьков кластеров, рост кавитационных зародышей до пенной структуры, её разрушение и эволюцию капельного состояния. По каждому из названных этапов проводятся эксперименты, строятся физические и математические модели.

В работе [6] рассматривается термодинамика образования полостей в метастабильных жидкостях в рамках классической теории зарождения. Авторы предлагают аналитические выражения для зависимости давления пара внутри полости от температуры и давления окружающей жидкости, аналитическую формулу для линии сосуществования жидкости и пара.

В работе [7] представлены результаты экспериментов по определению откольной прочности воды в широком интервале амплитуды и длительности импульсов сжатия, показано, что с увеличением амплитуды импульса сжатия прочность воды уменьшается, также в статье обсуждается возможность применения модели гомогенного зародышеобразования для интерпретации полученных экспериментальных данных. Зависимость скорости деформации от амплитуды импульса сжатия для дистиллированной воды была приведена в [8]. По экспериментальным данным была установлена степенная универсальность скорости деформации, аналогичная пластическим волновым фронтам в металлах. А в работе [9] экспериментально исследованы релаксационные свойства и разрушение воды в условиях ударно-волнового нагружения. Установлены степенные зависимости откольной прочности от скорости деформации в волне разгрузки и степенные зависимости скорости деформации от амплитуды напряжений на фронте волны сжатия. Были также исследованы неньютоновские свойства воды [10] в условиях электровзрывного эксперимента и получены степенные зависимости откольной прочности при тех же параметрах.

В статье [11] приведены результаты экспериментов по исследованию кавитационного механизма разрушения жидкостей в широкой области ударно-волнового нагружения. Методом лазерного гетеродин-интерферометра (PDV) регистрировались скорость свободной поверхности жидкостей и спектр скоростей облака частиц и струй, определялся их размер. Установлена величина откольной прочности дистиллированной воды.

Статья [12] содержит описание динамической модели откольного разрушения ДРК-L и особенностей численной реализации, а также результаты верификации модели ДРК-L на основании экспериментальных данных по ударно-волновому нагружению воды и других веществ. Модель ДРК-L была получена на основе модели ДРК, представленной в работе [13], которая основана на описании схлопывания одиночной поры с учётом упругопластических свойств среды. Полученные экспериментальные зависимости откольной прочности от скорости деформирования для воды хорошо согласуются с расчётными. Также авторы на основе описания движения одиночной поры предложили модель откольного разрушения и компактирования поврежденной среды [14]. Модель учитывает прочностные свойства, влияние давления, поверхностного натяжения и вязкости материалов, а также силы инерции. Представлены уравнения, описывающие динамику роста и схлопывания пор. Предложенную модель можно использовать для расчета откольного разрушения и компактирования жидкостей, а также металлов, находящихся как в твердом, так и в жидком (расплавленном) состоянии.

Выполнены эксперименты по исследованию импульсного растяжения воды при начальной температуре $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15], реализующегося при взаимодействии треугольного импульса сжатия со свободной поверхностью жидкости. Выявлена резкая зависимость величины отрицательных давлений, меняющихся в диапазоне $20\text{--}50\text{ МПа}$, от скорости деформирования, варьировавшейся в экспериментах от $1,8 \cdot 10^4\text{ с}^{-1}$ до $5,2 \cdot 10^4\text{ с}^{-1}$. Показано, что в экспериментах реализуются состояния, соответствующие области двойной метастабильности.

Разрушение воды, нагруженной расходящейся от взрыва электродетонатора ударной волной, изучалось в работе [16]. Авторы предлагают расчетную модель, показывают хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных. Здесь же исследуется вопрос зависимости прочности воды от количества растворенных в ней газов. Кавитация, генерируемая в воде аку-

стическим методом, рассматривается в работе [17]. Авторами изучается влияние растворенных газов, особенно кислорода и азота из воздуха, являющихся одними из наиболее распространенных видов примесей в воде.

При определенных условиях экспериментальные значения прочности воды на разрыв оказываются намного ниже теоретических значений, даже когда вода максимально очищена и дегазирована. Несоответствие может быть приписано стабилизированным нанопузырькам или наночастицам, взвешенным в жидкости, поскольку такие загрязнения не могут быть полностью удалены из значительного объема жидкости. Исследования в работе [18] направлены на выяснение влияния таких наноразмерных ядер на кавитацию. Результаты показывают, что наноразмерные ядра способствуют кавитации, т.е. прочность на разрыв заметно снижается из-за их присутствия. Прочность на разрыв уменьшается при увеличении размера ядер, а также на изменения кавитационного давления влияют свойства жидкости, в частности ее температура.

Интенсивность кавитации в зависимости от объема растворенного в ней газа рассматривается в работах [19, 20, 21]. В качестве исследуемых объектов авторами для экспериментов выбирались образцы воды различной обработки: дистиллированная, деионизированная и дегазированная вода.

В работе [22] представлены измерения эффективной прочности на разрыв (или «порога кавитации») дегазированных образцов коммерческого всесезонного моторного масла в рабочем диапазоне температур. В описанных экспериментах образцы жидкости подвергаются динамической нагрузке в результате быстрого цикла давление – натяжения, что является особенностью условий, в которых находится моторное масло в динамически нагруженном подшипнике качения. Авторы развивают свои исследования в этой области в работах [23], где кроме силиконовых масел рассматривается дегазированная вода, и в работе [24].

Влияние температуры и скорости динамической нагрузки на прочность при растяжении, коммерческих одно- и всесезонных масел исследуется в [25]. Измерения проводились методом динамического напряжения, включающим импульс напряжения, создаваемый отражением импульса давления на границе. Результаты работы показывают, что влияние температуры и скорости динамического нагружения является важным фактором для понимания кавитационных свойств и характеристик всесезонных масел.

В работе [26] исследуется гидродинамическая кавитация в большом объеме жидкости, обусловленная созданием разрежения в этом объеме. Объектами экспериментального исследования являются дистиллированная вода, минеральное масло для гидроприводов, морская вода, авиационный керосин. Авторы проводят сравнение кавитационных свойств жидкости, зависимость прочности от растворенных веществ, оценивают способности растворенного воздуха переходить в нерастворенное состояние.

Прочность воды на разрыв в микроканалах, растягиваемой с помощью лазерно-индуцированного отражения удара на границе раздела воздух-вода, исследуется в работе [27]. Методика использования разрыва в конце эксперимента по утонению капилляров для определения максимальной прочности на растяжение полиэтиленгликоля описывается в [28].

Кавитационное давление является мерой прочности жидкости на растяжение, которая определяет начало кавитации в гидродинамике. Предполагается, что присутствие твердых примесей способно стабилизировать воду. Исследованию этого явления с использованием аку-

стического метода посвящена работа [29]. В качестве твердых частиц используются наночастицы SiO_2 , образующие стабилизированные водородные связи с водой. Исследования показали, что увеличение концентрации частиц дополнительно снижает кавитационное давление и свободную энергию критического пузырька. При увеличении размера частиц кавитационное давление не существенно отличается от исходного, а наночастицы SiO_2 являются дестабилизирующими примесями, которые всегда способствуют возникновению кавитации в воде в текущих экспериментальных условиях.

Исследованию модели и теории ядер кавитации посвящена статья [30]. Автор рассматривает возможности стабилизации кавитационных ядер с очень высокой прочностью на разрыв в чистой воде путем сжижения молекул газа на границе раздела вода-газ газового пузырька, приближающегося к растворению, и образование кавитационных ядер путем молекулярной кластеризации молекул газа, уже находящихся в воде в растворенном состоянии.

Максимальная прочность жидкостей на разрыв является важным ориентиром для начала кавитации. Возможность предсказать это начало важна при разработке новых технологических установок в различных производствах. Исследования прочности жидкостей на разрыв, которые необходимы во многих областях, помогут понять, как стимулировать или предотвращать кавитацию и связанные с ней явления, а также получить фундаментальные теоретические знания, раздвигающие рамки теории кавитации.

В работе [33] по автомодельным закономерностям деформирования и разрушения сплошных сред при интенсивных воздействиях определены релаксационные свойства конденсированных сред (дистиллированная вода, глицерин, силиконовое и трансформаторное масло). Экспериментальному исследованию импульсного растяжения жидкостей при ударно-волновом воздействии посвящена работа [34], в которой изучены зависимости откольной прочности воды при температуре около $0\text{ }^\circ\text{C}$ и при импульсном растяжении и экспериментально реализовано состояние двойной метастабильности воды. Докторская диссертация по теме «Исследование вскипания перегретых и растянутых жидкостей» [35] содержит исследование влияния растворённого в жидкости газа на кавитационную прочность жидкостей. Также в работе показана возможность подавления центров кавитации растворённым в жидкости газом и другими легкокипящими примесями.

По результатам проведенного обзора можно сделать вывод, что до сих пор не существует единой методики определения динамической прочности жидкости.

Использованные методы и материалы

Сущность метода измерения прочности жидкости при кавитационных явлениях, предлагаемого авторами данной статьи, состоит в вычислении величин и применении подходов к обработке экспериментальных данных, аналогичных применяемым при определении динамической вязкости жидкости. В качестве критерия, позволяющего определить момент перехода от сплошного потока к кавитационному, в данной статье используется динамическая вязкость вещества, зависящая от скорости сдвига. При этом значении динамической вязкости двухфазного потока, очевидно, должно быть меньше значений вязкости для однофазного потока.

Конструкция использованной экспериментальной установки [31] представляет собой кавитационный миксер, помещенный в вакуумную камеру.

Давление окружающей среды является определяющей величиной для кавитационных процессов, так как напрямую влияет на кавитационные процессы, определяя температуру насыщенного пара. Эксперименты проводились для трех типоразмеров кавитационных мешалок (рис. 1) с отстоянной в течение суток водопроводной водой, в вакуумной камере с давлениями

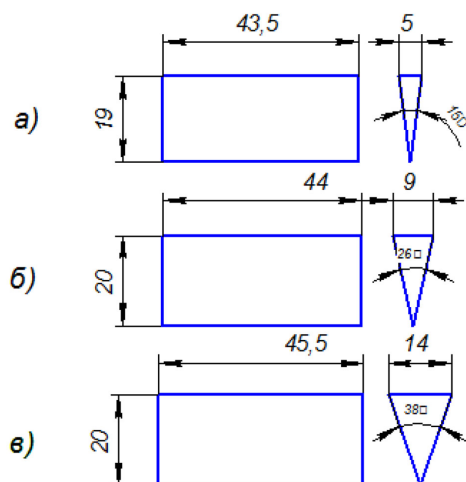


Рис. 1. Профили лопастных клиновидные мешалок с различными углами раствора: а – 15° (малая), б – 26° (средняя), в – 38° (большая)

Fig. 1. Profiles of blade wedge-shaped agitators with different angles: а – 15° (small), б – 26° (medium), в – 38° (large)

от 0,1 до 1 бар, в диапазоне скоростей вращения мешалок от 3000 до 10000 об/мин. В проведенных экспериментах определялась зависимость потребляемой миксером электрической мощности от скорости вращения крыльчатки и давления среды. Непосредственные результаты измерений приведены на рис. 2.

Скорость сдвига D , c^{-1} , для используемого аппарата можно рассчитать, применив известную формулу [32]:

$$D_r = \frac{2\omega R^2}{R^2 - \delta^2}, \quad (2)$$

где R – радиус мешалки, м; δ – толщина мешалки, м; ω – угловая скорость, c^{-1} .

Сдвигающее напряжение τ , Па во вращающемся потоке пропорционально моменту:

$$\tau = \frac{zM}{2\pi R^3}, \quad (3)$$

где z – численная постоянная используемого экспериментального устройства; M – момент на валу привода аппарата, Н·м;

Преобразуя формулу (3) с использованием известных формул расчета механических характеристик двигателя постоянного тока, можно связать момент на валу электродвигателя с величиной измеряемого электрического тока, следовательно, можно записать:

$$\tau \approx k \frac{2 \cdot I}{\pi R^3}, \quad (4)$$

где I – потребляемый ток, А, k – коэффициент преобразования, зависящий от характеристик электродвигателя установки, электронного регулятора частоты вращения и геометрии гидродинамической части установки.

Коэффициент преобразования, входящий в формулу (4), был определен исходя из того, что при минимальной частоте вращения режим течения был докавитационным и, следовательно,

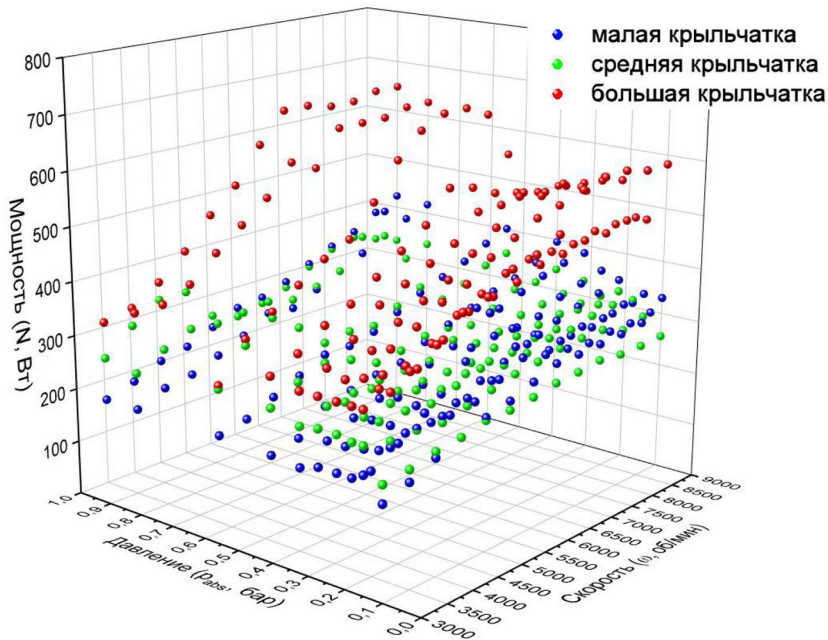


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности от частоты вращения и внешнего давления

Fig. 2. Dependence of power consumption on rotation speed and external pressure

отношение сдвигающего напряжения к скорости сдвига должно быть равно известному для воды значению динамической вязкости $\mu = \frac{\tau}{D_r}$ при текущей температуре (около 1,0 мПа·с).

Полученные данные были обработаны методом локальной полиномиальной регрессии, являющейся обобщением методов скользящего среднего и полиномиальной регрессии. Для сглаживания диаграммы рассеяния использовалась непараметрическая регрессия LOESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing – сглаживание локально оцененной диаграммы рассеяния). В качестве весовой функции была использована функция «трех кубов»:

$$\omega(x, y) = (1 - |d|^3)^3, \quad (5)$$

где d – расстояние от заданной точки данных до точки аппроксимирующей кривой. В анализе использован полином 1-й степени и значение $d = 0,5$. Результаты расчета по приведенным формулам и результаты регрессионного анализа, представленные в виде поверхностей, приведены на рис. 3–5.

Значения рассчитанного коэффициента динамической вязкости и результаты их аппроксимации приведены на рис. 6.

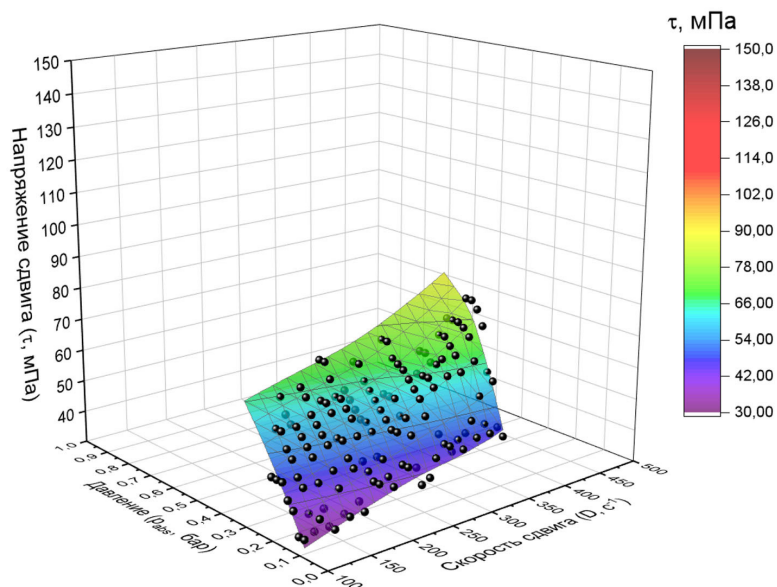


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига и внешнего давления для лопастной клиновидной мешалки с углом 15°

Fig. 3. Dependence of the shear stress on the shear rate and external pressure for a vane wedge-shaped agitator with an angle of 15°

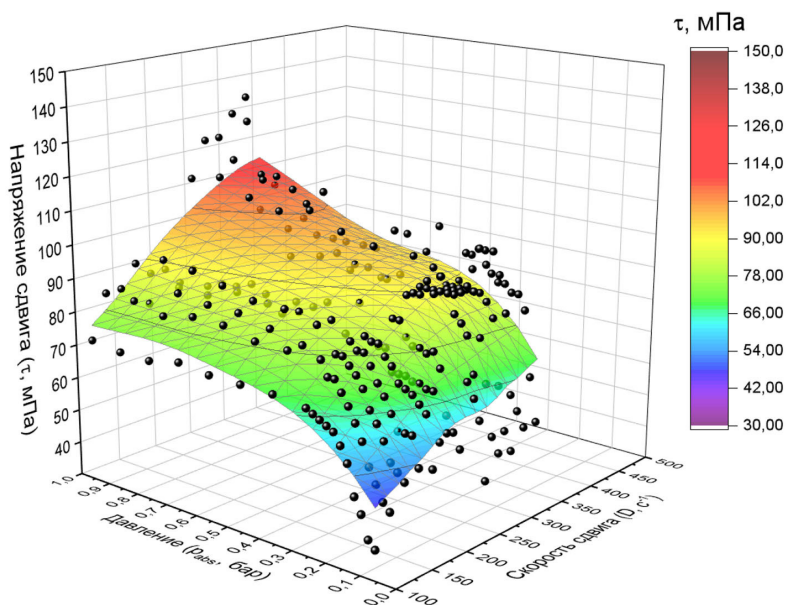


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига и внешнего давления для лопастной клиновидной мешалки с углом 26°

Fig. 4. Dependence of shear stress on shear rate and external pressure for a vane wedge-shaped agitator with an angle of 26°

Обсуждение результатов

Несмотря на достаточно большой разброс экспериментальных данных, результаты их ап-

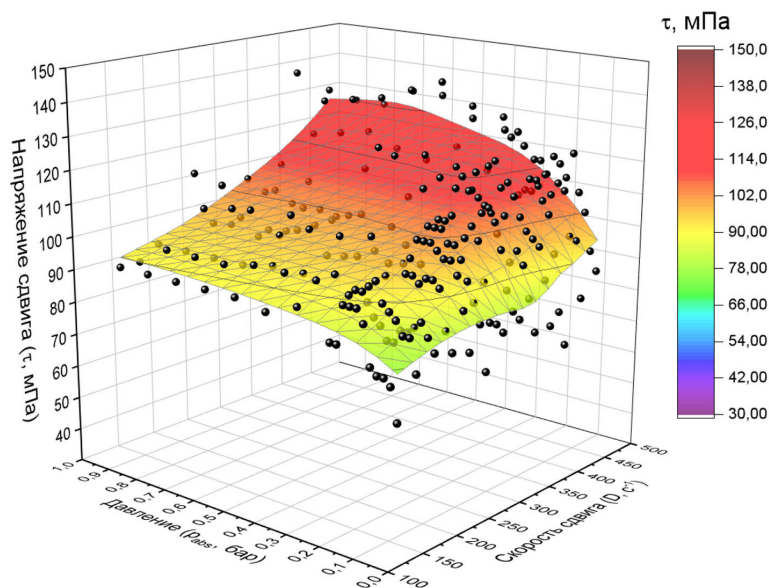


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига и внешнего давления для лопастной клиновидной мешалки с углом 38°

Fig. 5. Dependence of shear stress on shear rate and external pressure for a vane wedge-shaped agitator with an angle of 38°

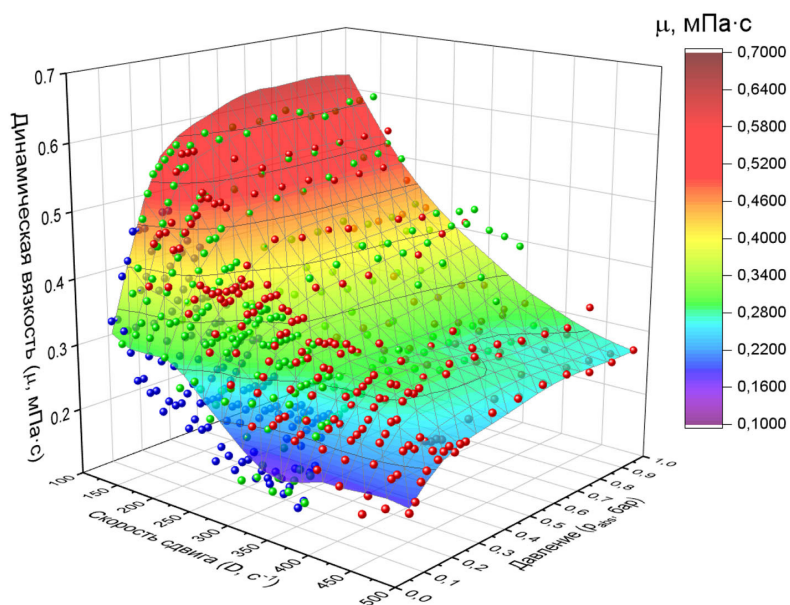


Рис. 6. Зависимость коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига и внешнего давления

Fig. 6. Dependence of the dynamic viscosity coefficient on the shear rate and external pressure

проксимации позволяют сделать однозначный вывод о зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига (рис. 3–5). Очевидно, что с ростом скорости и уменьшением внешнего давления интенсивность кавитационных процессов возрастает, а коэффициент динамической вязкости снижается (рис. 6).

Выбранные для подстановки в формулы (3) и (4) геометрические параметры и численные коэффициенты позволили получить адекватные значения скорости сдвига, напряжения сдвига и значения коэффициента динамической вязкости. Экспериментальные данные отличаются большим разбросом, что можно объяснить особенностями воды, выбранной в качестве объекта исследования; зависимостью экспериментальных данных от большого ряда факторов и условий эксперимента, однако предложенная методика обработки полученных экспериментальных данных позволяет с достаточной степенью точности определить коэффициент динамической вязкости и по его изменению зафиксировать начало нарушения сплошности потока, т.е. кавитационных процессов в жидкости.

Выводы

Проведенный обзор публикаций, посвященных методам изучения кавитационной прочности, показал, что в настоящее время не применяются подходы и методы, использующие анализ кривых текучести жидкости. Предложенный метод позволяет связать силу и напряжение сдвига с кавитационными явлениями в потоке. Очевидно, что при переходе от сплошного течения к течению в двухфазной среде коэффициент динамической вязкости должен становиться меньше с увеличением доли парогазовой фазы в потоке (развитие кавитации). При использовании непосредственного аппаратного измерения вращающего момента, а не через установленную связь между электрическими параметрами и напряжением сдвига, предлагаемый метод должен показать большую точность и может упростить анализ кавитационной прочности технологических жидкостей, используемых в различных производственных установках.

Список литературы / References

- [1] Kwak H. -Y., Kang K. -M., Ko I. The absolute metastable limit of liquids under tension-A review, *Evolutionary Ecology*, 2011, 25(4), 863–869.
- [2] Mørch K. A. Reflections on cavitation nuclei in water, *Physics of Fluids*, 2007, 19(7), 072104.
- [3] Temperley H. N. V., Trevena D. H. Why is the tensile strength of water measured dynamically less than that measured statically? (1987) *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20(8), статья 018, 1080–1081.
- [4] Williams P. R., Williams R. L. On anomalously low values of the tensile strength of water, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 456(1998), 1321–1332.
- [5] Кедринский В.К. Нелинейные проблемы кавитационного разрушения жидкости при взрывном нагружении (обзор), *ПМТФ*, 1993, 34(3), 74–91 [Kedrinsky V.K. Nonlinear problems of cavitation destruction of liquid under explosive loading (review), *PMTF*, 1993, 34(3), 74–91 (in Rus.)].
- [6] Xiao C., Heyes D.M. Cavitation in stretched liquids, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, 458(2020), 889–910.

[7] Богач А. А., Уткин А. В. Прочность воды при импульсном растяжении, *ПМТФ*, 2000, 4(4), 198–205 [Bogach A. A., Utkin A. V. The strength of water under pulsed tension, *PMTF*, 2000, 4(4), 198–205 (in Rus.)].

[8] Наймарк О. Б., Уваров С. В., Банникова И. А., Ефремов Д. В. Многомасштабная неустойчивость пластических сдвигов как механизм турбулентности, *Тезисы докладов Международных конференций «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций»*, 2018, 10–11 [Naimark O. B., Uvarov S. V., Bannikova I. A., Efremov D. V. Multiscale instability of plastic shifts as a mechanism of turbulence, *Abstracts of reports of International conferences «Promising materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures» and «Chemistry of oil and gas» in the framework of the International Symposium «Hierarchical materials: development and applications for new technologies and reliable structures»*, 2018, 10–11 (in Rus.)] DOI: 10.17223/9785946217408/4.

[9] Банникова И. А., Зубарева А. Н., Уткин А. В., Уваров С. В., Наймарк О. Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушение жидкостей при интенсивных воздействиях, *Физическая мезомеханика*, 2016, 19(3), 69–77 [Bannikova I. A., Zubareva A. N., Utkin A. V., Uvarov S. V., Naimark O. B. Metastable states, relaxation mechanisms and destruction of liquids under intense influences, *Physical mesomechanics*, 2016, 19(3), 69–77 (in Rus.)].

[10] Банникова И. А., Уваров С. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б. Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения, *Письма в Журнал технической физики*, 2014, 40(17), 87–93 [Bannikova I. A., Uvarov S. V., Bayandin Yu. V., Naimark O. B. Experimental study of non-Newtonian properties of water under conditions of electroexplosive loading, *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2014, 40(17), 87–93 (in Rus.)].

[11] Фёдоров А. В., Михайлов А. Л., Финюшин С. А., Калашников Д. А., Чудаков Е. А., Бутусов Е. И., Гнутов И. С. Регистрация спектра скоростей частиц при выходе ударной волны на поверхность жидкостей различной вязкости, *Физика горения и взрыва*, 2016, 52(4), 122–128 [Fedorov A. V., Mikhailov A. L., Finyushin S. A., Kalashnikov D. A., Chudakov E. A., Butusov E. I., Gnutov I. S. Registration of the particle velocity spectrum at the shock wave exit to the surface of liquids of various viscosities, *Physics of gorenje and explosion*, 2016, 52(4), 122–128 (in Rus.)] DOI: 10.15372/FGV20160412.

[12] Десятникова М. А., Игнатова О. Н., Раевский В. А. Динамическая модель откольного разрушения в жидкостях и твердых телах, *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика*, 2016, 4, 46–54 [Desyatnikova M. A., Ignatova O. N., Rayevsky V. A. Dynamic model of spall fracture in liquids and solids, *Issues of atomic science and technology. Series: Theoretical and Applied Physics*, 2016, 4, 46–54 (in Rus.)].

[13] Игнатова О. Н., Раевский В. А., Целиков И. С. Кинетическая модель компактирования поврежденности в средах с прочностью, *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов*, 2014, 1, 18–23 [Ignatova O. N., Rayevsky V. A., Tselikov I. S. Kinetic model of damage compaction in environments with strength, *Issues of atomic science and technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes*, 2014, 1, 18–23 (in Rus.)].

[14] Десятникова М. А., Игнатова О. Н., Раевский В. А., Целиков И. С. Динамическая модель роста и схлопывания пор в жидкостях и твердых веществах, *Физика горения и взрыва*, 2017,

53(1), 115–122 [Desyatnikova M. A., Ignatova O. N., Rayevsky V. A., Tselikov I. S. Dynamic model of pore growth and collapse in liquids and solids, *Physics of gorenje and explosion*, 2017, 53(1), 115–122 (in Rus.)] DOI: 10.15372/FGV20170114.

[15] В. А. Сосиков, А. В. Уткин, В. Е. Фортов Особенности разрушения воды вблизи температуры замерзания при импульсном растяжении, *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2008, 133(5), 1036–1042 [V. A. Sosikov, A. V. Utkin, V. E. Fortov Features of water destruction near the freezing point under pulsed tension, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, 133(5), 1036–1042 (in Rus.)].

[16] Федоров А. В., Игнатова О. Н., Антонюк Л. К., Гнутов И. С., Говорунова Т. А., Яговкин А. О. Регистрация параметров откольного разрушения воды в зависимости от её исходного состояния, *XIX Харитоновские чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Сборник докладов*, 2017, 1, 422–426 [Fedorov A. V., Ignatova O. N., Antonyuk L. K., Gnutow I. S., Govorunova T. A., Yagovkin A. O. Registration of parameters of water breakage depending on its initial state, *XIX Kharitonov readings. Extreme states of matter. Detonation. Shock waves. Collection of reports*, 2017, 1, 422–426 (in Rus.)].

[17] Li B., Gu Y., Chen M. An experimental study on the cavitation of water with dissolved gases, *Experiments in Fluids*, 2017, 58(164). doi.org/10.1007/s00348-017-2449-0.

[18] Gao Z., Wu W., Wang B. The effects of nanoscale nuclei on cavitation, *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 911(A20). doi.org/10.1017/jfm.2020.1049.

[19] Радзюк А. Ю., Истягина Е. Б. Метод определения динамической прочности жидкости, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, 10(1), 44–47 [Radzyuk A. Yu., Istyagina E. B. Method for determining the dynamic strength of a liquid, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, 10(1), 44–47 (in Rus.)].

[20] Boteler J. M., Sutherland G. T. Tensile failure of water due to shock wave interactions, *Journal of Applied Physics*, 2004, 96 (11), 6919–6924.

[21] Sosikov V. A., Utkin A. V., Fortov V. E. Cavitation in water under tension near the freezing point, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, 106 (5), 905–909.

[22] Williams P. R., Williams P. M., Brown S. W. J., Temperley H. N. V. On the tensile strength of water under pulsed dynamic stressing, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, 455(1989), 3311–3323.

[23] Williams P. R., Williams R. L. Cavitation and the tensile strength of liquids under dynamic stressing, *Molecular Physics*, 2004, 102(19–20), 2091–2102.

[24] Williams R. L., Williams P. R., Al-Hussany A. F. H. The tensile strength of water as a function of temperature, *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers Fluids Engineering Division Summer Conference*, 2005, 2, 525–530.

[25] Williams R. L., Williams P. R., Chan C. H. H., Brad R., Al-Hussany A. F. H. The Effects of Temperature and Rate of Dynamic Stressing on the Tensile Strength of Monograde and Multigrade Oils, *Small Engine Technology Conference & Exposition*, 2006. doi.org/10.4271/2006-32-0017.

[26] Ефремова К. Д., Пильгунов В. Н. Кавитационные свойства жидкостей, *Наука и образование. МВТУ им. Баумана*, 2016, 3, 12–36 [Efremova K. D., Pilgunov V. N. Cavitation properties of liquids, *Science and education. Bauman Moscow State Technical University*, 2016, 3, 12–36 (in Rus.)].

[27] Li Z.G., Xiong S., Chin L.K., Ando K., Zhang J.B., Liu A.Q. Water's tensile strength measured using an optofluidic chip, *Lab on a Chip*, 2015, 15 (10), 2158–2161.

[28] Lubansky A. S., Brad R., Williams P. R., Deganello D., Claypole T. C. Measuring maximum tensile strength of liquids at low stressing rates, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166 (16), 896–899.

[29] Gu Y., Li B., Chen M. An experimental study on the cavitation of water with effects of SiO₂ nanoparticles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 79, 195–201.

[30] Mørch K. A. Cavitation Nuclei and Tensile Strength of Water January 2018, In book: *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation Baltimore*, Maryland, USA, 2018, 233–238. DOI:10.1115/1.861851_ch45.

[31] Радзюк А. Ю., Истягина Е. Б. Экспериментальное определение режима течения при радиальном движении жидкости, *Журнал СФУ: Техника и технологии*, 2014, 7(7), 48–54 [Radzyuk A. Yu., Istyagina E. B. Experimental determination of the flow regime in radial fluid motion, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2014, 7(7), 48–54 (in Rus.)].

[32] Малкин А. Я., Исаев А. И. *Реология: концепции, методы, приложения*. СПб.: Профессия, 2007. 560 [Malkin A. Ya., Isaev A. I. *Rheology: concepts, methods, applications*. St. Petersburg: Profession, 2007. 560 (in Rus.)].

[33] Банникова И. А. *Автомодельные закономерности деформирования и разрушения сплошных сред при интенсивных воздействиях*, автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2017, 22 [Bannikova I. A. *Self-similar patterns of deformation and destruction of continuous media under intense influences, abstract. dis. ... cand. of phys.-math Sci.* Tomsk, 2017, 22 (in Rus.)].

[34] Сосиков В. А. *Экспериментальное исследование импульсного растяжения жидкостей при ударно-волновом воздействии*, дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черногловка, 2006, 101 [Sosikov V. A. *Experimental study of pulsed stretching of liquids under shock-wave action, dis. ... cand. of phys.-math Sci.* Chernogolovka, 2006, 101 (in Rus.)].

[35] Виноградов В. Е. *Исследование вскипания перегретых и растянутых жидкостей*, дис. ... д-р физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2006. 243 [Vinogradov V. E. *Investigation of boiling of superheated and stretched liquids, dis. ... doctor of phys.-math Sci.* Yekaterinburg, 2006. 243 (in Rus.)].