

УДК 543.8 + 541.13

Кавитационные свойства жидкостей

Ефремова К. Д.^{1,*}, Пильгунов В. Н.¹

* efremova.k.d@gmail.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены физические основы кавитационных процессов в технических жидкостях и растворах: в дистиллированной воде, морской воде, чистом глицерине, минеральном масле, керосине, насыщенном растворе NaCl и растворе глицерина в воде. Показаны принципиальная схема и конструктивные особенности разработанной экспериментальной установки, предназначенной для исследования прочности жидкости на разрыв. Разряжение в жидкостях создавалось гидравлическим вакуумным насосом, созданным на базе дифференциального гидроцилиндра с пневмоприводом. Представлены использованные в эксперименте технологии гидростатической и гидродинамической дегазации жидкости. Приведены численные результаты экспериментального исследования кавитационных свойств жидкостей: минимально достижимых абсолютных давлений в жидкостях при их гидростатической кавитации, сравнительных оценок прочности жидкостей на разрыв, степени влияния растворенного вещества на кавитационные свойства растворителя.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке конструкций объемных гидромашин и гидравлических устройств автоматики.

Ключевые слова: гидродинамическая дегазация, гидростатическая кавитация, допустимое разряжение в жидкости, прочность жидкости на разрыв, гидравлический вакуумный насос с пневмоприводом

Введение

Основные физические свойства технических жидкостей, без знания которых невозможно грамотное инженерное проектирование гидравлических машин и механизмов, достаточно хорошо изучены и широко представлены в технической литературе. К таким свойствам следует отнести плотность, вязкость, сжимаемость, температурное расширение, растворимость газов, поверхностное натяжение и испаряемость. Учет только этих свойств жидкости недостаточен в случаях, когда в рабочих камерах машин и в полостях гидравлических устройств автоматики абсолютное давление падает ниже атмосферного и жидкость находится в разреженном состоянии.

Существует большое количество работ, среди которых можно отметить [1...5], посвященных вопросу *прочности жидкости на разрыв*, хотя это понятие является чисто условным, так как жидкость, в отличие от твердого тела, не может продолжительное время

выдерживать растягивающие напряжения. Динамический разрыв жидкости, при котором она лишь доли секунды испытывала растягивающее напряжение (абсолютное давление, при этом, становилось меньше нуля) был осуществлен Дэвисом (Davies R.M.) в 1955 году. Автор работы [6] выполнил исследования *разрывной прочности* минерального масла, оценивая ее величиной абсолютного давления, при котором жидкость перестает быть сплошной средой и из нее начинают выделяться паро - газовые пузырьки малого размера. Именно началом выделения таких пузырьков оценивалась разрывная прочность реальной жидкости, хотя происходило некоторое уменьшение абсолютного давления при полном разрыве сплошности с образованием в объеме жидкости крупных кавитационных каверн.

Гидродинамическая кавитация в жидкости, обусловленная резким падением абсолютного давления при увеличении скоростного напора в сжатом сечении потока, имеет локальный характер.

Предметом предлагаемой работы является исследование *гидростатической кавитации* в сравнительно большом объеме жидкости, которая обусловлена созданием в этом объеме глубокого разрежения (вакуума) посредством вакуумного гидравлического насоса. В тексте статьи будет использован общепринятый термин *вакуумный насос*, хотя сам насос, по своему определению, является гидравлической машиной, предназначенной для создания в жидкости повышенного, по отношению к атмосферному, давления. В работе не используется некорректное, по мнению авторов, однако устоявшееся в технической литературе, понятие *отрицательное давление*.

Физические основы кавитации

В качестве объектов исследования выбраны технические жидкости, имеющие существенные различия в физических свойствах и широко применяемые в машиностроении и технике гидроприводов:

- дистиллированная вода;
- морская вода;
- насыщенный раствор поваренной соли (NaCl) в дистиллированной воде;
- чистый глицерин (3-х атомный спирт) с массовой долей глицерина 99 %;
- водный раствор глицерина с массовым содержанием компонентов 51 / 49 %;
- минеральное масло для гидроприводов МГЕ 10 вязкостью 20 сСт при $t^{\circ} \text{C} = 20^{\circ}\text{C}$;
- авиационный керосин марки ТС 1.

Выбор глицерина и авиационного керосина в качестве исследуемых жидкостей был сделан с учетом существенного различия их физических свойств, а именно, кинематической вязкости, модуля объемной упругости, давления насыщенных паров и коэффициента поверхностного натяжения (табл.1) при нормальных условиях ($t^{\circ} \text{C} = 20^{\circ} \text{C}$, $p_{\text{ат.}} = 98,1 \text{ кПа}$).

Таблица 1 Физические свойства жидкостей

Исследуемая жидкость	Вязкость, сСт	Плотность г/см ³	Модуль упру гост-ти, МПа	Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	Давление насыщенных паров, кПа
Вода дистиллированная	1,0	1,00	1800	0,0727	2,34
Вода морская	1,05	1,015	1900	0,080	2,50
Насыщенный раствор NaCl в воде	1,4	1,10	2000	0,082	2,80
Глицерин 99 %	700	1,26	4200	0,0657	0,05
Водный раствор глицерина 51 / 49 % (по массе)	40	1,13	3000	0,070	2,90
Минеральное масло МГЕ 10	20	0,86	1600	0,10	0,60
Керосин ТС1	1,25	0,79	1230	0,027	0,67

В доступной технической литературе отсутствуют точные данные о давлении насыщенных паров чистого глицерина, приводятся значения этой величины только при высоких температурах ($p_{н.п.} = 2,67$ кПа при $t^{\circ}C = 182^{\circ}C$ и $p_{н.п.} = 1,2$ кПа при $t^{\circ}C = 166^{\circ}C$). Упомянуется также, что при нормальной температуре $t^{\circ}C = 20^{\circ}C$ и атмосферном давлении чистый глицерин практически не испаряется.

Интерес к морской воде обусловлен проблемами создания специальных гидроприводов, использующих в качестве рабочей жидкости заборную воду.

Исследования кавитационных свойств насыщенного раствора NaCl в воде и водного раствора глицерина связаны с оценкой влияния твердого и жидкого *растворимого вещества* на кавитационные свойства *растворителя*, в рассматриваемом случае - дистиллированной воды.

Оценка кавитационных свойств минерального масла, как основной рабочей жидкости для гидроприводов, необходима для большего понимания особенностей быстропротекающих процессов, которые происходят в полостях гидравлических машин и аппаратов.

В соответствии с молекулярной теорией строения жидкого вещества, на отдельную мельчайшую частицу (молекулу) со стороны соседних частиц одновременно действуют силы притяжения $F_{пр.}$ и силы отталкивания $F_{от.}$, пропорциональные расстоянию r между молекулами (рис. 1).

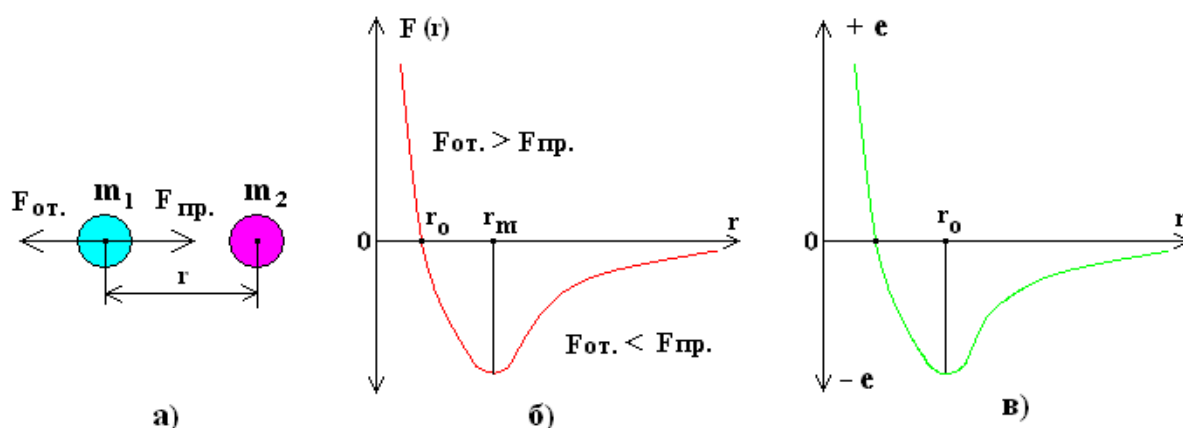


Рис. 1. К теории молекулярного строения жидкого вещества

Если расстояние между двумя молекулами принимает равновесное значение $r = r_0$, то $F_{от.} = F_{пр.}$ и результирующая сила $F(r) = F_{от.} - F_{пр.} = 0$. При значениях $r > r_0$ превалирует сила притяжения $F_{пр.} > F_{от.}$, а при $r < r_0$ – сила отталкивания $F_{от.} > F_{пр.}$. Потенциальная энергия « e » отдельной молекулы связана с силой $F(r)$ соотношением $de = -F(r)dr$. При значении $r = r_0$ сила $F(r) = 0$ и $de/dr = 0$, что соответствует минимуму энергии. По мнению физиков, величина $r_0 \leq 10^{-6} \dots 10^{-7}$ мм [4]. При сжатии жидкости расстояние между молекулами уменьшается, при этом резко возрастают силы отталкивания, препятствующие сближению молекул.

В соответствии с «дырочной» теорией жидкого состояния вещества, в результате большой подвижности молекул, в жидком теле возникают микроскопические разрывы сплошности – «дырки» [7]. Тепловое движение молекул в объеме жидкости приводит к тому, что «дырки» самопроизвольно исчезают в одних местах и одновременно появляются в других, что соответствует их хаотическому перемещению (миграции). Дырочная теория не применима к жидкостям, находящимся под высоким внешним давлением (порядка 100 МПа), когда ее сжимаемость сравнима со сжимаемостью твердого тела. Объемы «дырок» в жидкости не могут оставаться пустыми и они активно заполняются газом, контактирующим со свободной поверхностью жидкости (или со смесью газов – воздухом, если поверхность жидкости контактирует с атмосферой). В силу этого, в реальной жидкости всегда присутствует растворенный в ней воздух и ее можно рассматривать как раствор растворимого вещества (воздуха) в растворителе.

Тепловое движение представляет собой нерегулярные колебания молекул относительно временных неустойчивых центров равновесия. Каждая молекула некоторое время t_0 (время «оседлой жизни») находится в упорядоченном положении по отношению к ближайшим соседкам. Кинетическая энергия таких колебаний, в определенные моменты времени, может оказаться достаточной для преодоления сил межмолекулярных связей, при этом отдельная молекула скачком переходит в окружение других молекул, сменив центр

равновесия. Такие переходы определяют текучесть жидкости: чем меньше изменений в расположении молекул, тем больше вязкость жидкости.

Состояние устойчивого равновесия жидкого, условно несжимаемого тела, соответствует минимуму отношения площади его поверхности к объему. Работа изотермического образования единицы площади поверхности характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ жидкости с другой фазой (газообразной, жидкой или твердой).

Вблизи свободной поверхности и в самом поверхностном слое жидкости действуют силы, обеспечивающие само существование этого слоя и не позволяющие молекулам покидать объем жидкости. Однако, некоторые из них, благодаря тепловому движению, обладают довольно большой кинетической энергией, что позволяет им преодолеть эти силы, покинуть объем жидкости через свободную поверхность или «проткнуть» поверхность находящегося в жидкости воздушного пузыря. Если молекулы, покинувшие объем, удаляются с поверхности жидкости, то весь объем в конце концов испарится. Если покинувшие объем молекулы не удаляются, то они парят над поверхностью и формируют насыщенный пар. Возврат молекул в объем жидкости называется *конденсацией* (не путать с конденсацией пара на холодной поверхности).

В физике жидкого тела под *кипением* понимают процесс парообразования внутри объема жидкости при повышении температуры в условиях постоянства абсолютного давления на ее поверхности [4].

Холодное кипение жидкости, происходящее при сравнительно низкой температуре и пониженном абсолютном давлении внутри объема или на поверхности жидкости, рассматривается как гидродинамическая или гидростатическая кавитации. В соответствии с законом Дальтона – Генри, часть заполняющего «дырки» растворенного в жидкости воздуха, при понижении абсолютного давления, покидает межмолекулярное пространство, не успевает всплыть на поверхность за счет естественной флотации, превращается в микропузырьки нерастворенного воздуха и становится генератором кавитационных ядер. Впоследствии эти ядра кавитации укрупняются и превращаются в кавитационные каверны.

В качестве справки необходимо отметить, что способность жидкости растворять в себе воздух, характеризуется коэффициентом растворимости K (при нормальной температуре $t^0 \text{ C} = 20^0 \text{ C}$ для воды $K = 0,016$; для минерального масла $K = 0,08$; для глицерина $K = 0,020$ и для керосина $K = 0,13$). Скорость растворения воздуха в жидкости не постоянна: так, первые 25 % его возможного объема растворяются практически мгновенно из-за активного насыщения поверхностных слоев жидкости, а остальные 75 % заполняют межмолекулярное пространство в процессе медленной диффузии. Равновесные микропузырьки нерастворенного в вязкой жидкости воздуха округлой формы, диаметром 1...10 мкм, не подвергаются естественной флотации, (любая техническая жидкость является в той или иной степени вязкой): такие микропузырьки постоянно присутствуют в объеме любой, не прошедшей специальную обработку (дегазацию) жидкости. Спонтанное увеличение размеров этих пузырьков и их превращение в каверны происходит тогда, когда внутрь пу-

зырька через поверхность раздела прорываются молекулы пара, или, когда в окружающей пузырьке жидкости резко падает абсолютное давление.

В соответствии с теорией кавитации, фаза кавитации, связанная с образованием в жидкости каверн, начинается тогда, когда локальное абсолютное давление в полностью дегазированной жидкости падает до значения давления насыщенных паров $p_{н.п.}$ [4]. В реальной жидкости этот процесс начинается раньше, в виду наличия в ней кавитационных ядер. В замкнутой камере, ограниченной твердыми стенками, например, в поршневой полости гидроцилиндра вакуумного насоса, начальная фаза образования паро - газовых каверн может начаться раньше. Это может произойти по причине отрыва жидкости от твердой стенки, если сила прилипания жидкости, приведенная к площади стенки, окажется меньше абсолютного давления в жидкости. Такой процесс вполне возможен в быстродействующих роторных гидромашинах. В этом случае активные ядра кавитации будут зарождаться на твердой стенке поршня (частично гидрофобная поверхность).

Если в жидкости полностью отсутствует нерастворенный воздух, (что маловероятно из-за отсутствия естественной флотации мелкодисперсных пузырьков в вязкой жидкости), то величина допустимого разрежения в жидкости должна определяться только упругостью ее насыщенных паров и величиной коэффициента поверхностного напряжения (см. рассмотренную далее динамику микропузырька). Однако, можно предположить, что растворенный воздух, как растворимое вещество, может влиять на испаряемость растворителя.

Если существуют физические условия естественной флотации пузырьков, то допустимое разрежение в жидкости можно оценивать наличием одного из трех признаков:

- зарождение видимых невооруженным глазом микропузырьков диаметром 20..50 мкм;
- начало естественной флотации укрупнившихся пузырьков на поверхность жидкости;
- образование крупных каверн с отрывом жидкости от твердой стенки (при вертикальном расположении кавитационной камеры – от ее крышки).

В очень вязкой жидкости, например, глицерине, рост ядер кавитации демпфируется, естественная флотация микропузырьков отсутствует, что приводит к длительному существованию в жидкости ядер кавитации.

Как было упомянуто выше, у гидрофобных твердых поверхностей отрыв жидкости и спонтанное образование крупных каверн может наступить раньше, чем будут обнаружены микропузырьки.

Физика развития ядра кавитации и его превращения в каверну была впервые опубликована Рэлеем (Rayleigh, Lord) в 1917 году и подробно изложена в фундаментальном труде Кнэппа, Дэйли и Хэммита [4].

Статическое равновесие воздушного пузырька сферической формы (рис. 2), в условиях невесомости, соответствует уравнению

$$P_{\text{жидк.}} + P_{\sigma} - P_{\text{газа}} = 0, \quad (1)$$

где $P_{\text{жидк}} = p_0 \pi R^2$ – сила давления жидкости, окружающей пузырек, на его наружную криволинейную поверхность; p_0 – абсолютное давление в жидкости; R – радиус пузырька; $P_\sigma = 2\pi R\sigma$ – сила поверхностного натяжения; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $P_{\text{газа}} = p \pi R^2$ – сила давления пара и воздуха внутри пузырька на его внутреннюю криволинейную поверхность; $p = p_{\text{пара}} + p_{\text{воздуха}}$ – суммарное абсолютное давление пара и воздуха внутри пузырька.

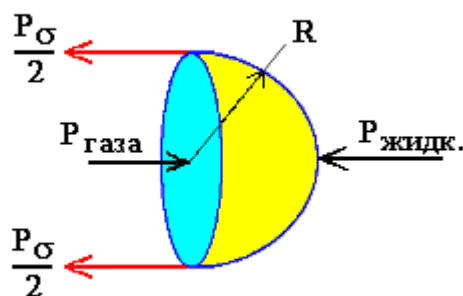


Рис. 2. Динамика парогазового пузырька

Таким образом, величина давления p внутри пузырька, давления жидкости снаружи пузырька p_0 и его радиус R связаны равенствами

$$p = p_0 + 2\sigma/R, \quad (2)$$

$$p_0 = p - 2\sigma/R, \quad (3)$$

$$R = 2\sigma/(p - p_0). \quad (4)$$

В соответствии с уравнением (3), абсолютное давление p_0 в жидкости, окружающей пузырек, теоретически может быть меньше суммарного абсолютного давления p внутри пузырька на величину $p_\sigma = 2\sigma/R$, определяемую коэффициентом поверхностного натяжения, т.е. $p_0 < p$.

Увеличение радиуса R пузырька возможно при наличии одного из четырех факторов или их совокупности:

- диффузия растворенного воздуха через стенку внутрь пузырька;
- расширение содержащегося в пузырьке воздуха при повышении температуры жидкости;
- повышение давления насыщенных паров жидкости внутри пузырька;
- понижение абсолютного давления в окружающей пузырек жидкости.

Увеличение размера пузырька будет происходить с умеренной скоростью, если динамика роста определяется диффузией растворенного воздуха внутрь пузырька или при расширении содержащихся внутри пузырька нерастворенного воздуха и пара [4].

По мнению авторов настоящей статьи, в работе [8] использован некорректный термин «кавитирующий пузырек», поскольку процессу кавитации, как разрыву сплошности

среды, подвергаются только жидкости. Вызывает, также, недоумение фраза «...пузырьки появляются в жидкости и быстро исчезают под действием капиллярного давления».

На скорость процесса расширения пузырька может влиять динамика понижения абсолютного давления в жидкости (гидростатическая или гидродинамическая кавитации), а также испарение жидкости внутрь пузырька при повышении температуры жидкости (кипение).

Большой интерес представляют процессы быстрого смыкания («схлопывания») пузырька на уровне точечного взрыва при его попадании в область повышенного давления [9] и эволюция формы поверхности пузырька при его «сверх сжатии» [10]. Такие процессы определяют силовые воздействия на контактирующие с жидкостью твердые поверхности [11...13]

Гидростатическая кавитация происходит во всем объеме жидкости при сравнительно малых и средних скоростях понижения абсолютного давления в жидкости. К гидростатической кавитации можно отнести *присоединенную кавитацию*, при которой прилипающие пузырьки периодически отрываются от твердой стенки.

Гидродинамическая кавитация носит локальный характер и происходит, согласно уравнению Бернулли, в местах резкого падения абсолютного давления в жидкости, обусловленного увеличением скоростного напора. Такая кавитация относится к разряду *перемещающейся кавитации*, когда в жидкости образуются каверны, уносимые потоком.

Разновидностью гидродинамической кавитации является *акустическая кавитация*, возникающая на поверхности осциллятора и в ограниченном объеме жидкости под действием ультразвука [14...17].

В работах [18, 19] приводятся сведения об обнаруженных в кавитирующем потоке минерального масла интенсивных электрических процессах и светоизлучении.

Примеси в жидкости могут присутствовать в виде растворов и взвесей. Они участвуют в процессе образования ядер кавитации, рост которых возможен только в том случае, если они влияют на факторы, определяющие равенство (1), в частности, на коэффициент поверхностного натяжения (σ), давление насыщенных паров ($p_{\text{пара}}$) и силы межмолекулярного взаимодействия (размеры «дырок»).

Растворяться в растворителе могут как твердые вещества, так и жидкости и газы. Реакция растворения обратима: при удалении растворенного вещества растворитель полностью восстанавливает свои исходные физические и химические свойства.

В воде, как в сильном растворителе с высокой поляризацией молекул, почти всегда растворение твердых веществ (например, солей) сопровождается распадом их молекул на ионы (диссоциация). При этом, молекулы воды остаются целыми после удаления растворенного вещества из раствора.

По Менделееву, растворение вещества в воде сопровождается, во-первых, разрушением химических связей между молекулами (межмолекулярных связей в ковалентных веществах) или между ионами (в ионных веществах). В результате этого, частицы растворимого вещества смешиваются с водой, в которой, частично, разрушаются водородные

связи между молекулами. Во-вторых, попавшие в воду частицы вещества (молекулы или ионы) могут подвергнуться гидратации, в результате чего образуются гидраты – соединения неопределенного состава между частицами вещества и молекулами воды, при этом, внутренний состав самих частиц вещества не изменяется.

В водных растворах, соли полностью или частично диссоциируются на ионы. Авторы статьи не смогли получить, в достаточном объеме, информацию о влиянии растворимого в воде вещества на упругость ее насыщенных паров и на коэффициент поверхностного натяжения. Авторы работы [8] отмечают, что «...добавление в водную среду небольших количеств поверхностно активных веществ, при прочих равных условиях, практически не влияют на активность кавитации». Перед началом проведения экспериментальных исследований можно было, лишь априорно, прогнозировать влияние разрыва части водородных связей между молекулами растворителя на упругость его насыщенных паров и кавитационные свойства.

Растворение воздуха в жидкости аналогично растворению в ней твердых веществ с созданием устойчивых растворов: молекулы воздуха испытывают притяжение со стороны молекул растворителя и активно поглощаются им в больших количествах. Попадание воздуха в жидкость всегда возможно, вследствие высокой скорости его молекул, которые пробивают не только поверхностный энергетический барьер жидкости, но активно внедряются в ее межмолекулярное пространство. Как и в случае растворения твердых веществ в растворителе, предполагается, что вследствие внедрения молекул воздуха, разрушается часть водородных связей между молекулами воды или гидроксильных связей между молекулами органического растворителя, каковыми являются смеси углеводов и спирты, в частности, минеральное масло, керосин и глицерин.

Можно предполагать наличие влияния *жидкого* растворимого вещества (в рассматриваемом случае - глицерина) на кавитационные свойства растворителя. В тоже время, в работе [4] отмечается, что «...добавка смешивающейся жидкости не оказывает почти никакого влияния на основу: величина минимальной прочности на разрыв будет соответствовать менее прочной из двух...».

С учетом вышесказанного, авторами статьи были поставлены следующие задачи исследования:

- определение нижнего предела абсолютного давления, который может быть достигнут в жидкости при ее гидростатической кавитации;
- количественная оценка разницы между нижним пределом абсолютного давления в жидкости и давлением ее насыщенных паров;
- сравнение кавитационных свойств жидкостей, обладающих существенным различием физических свойств;
- исследование влияния растворимого вещества (твердого, жидкого и газообразного) на кавитационные свойства растворителя;
- количественная оценка влияния степени гидродинамической дегазации жидкости на ее кавитационные свойства;

- оценка способностей растворенного воздуха переходить в нерастворенное состояние;
- визуальное наблюдение за процессом зарождения ядер кавитации и их превращения в каверны.

При решении поставленных задач трудно разделить степени влияния на кавитационные свойства растворителя твердого, жидкого и газообразного растворимых веществ, одновременно присутствующих в растворе.

Особый интерес авторов статьи был проявлен к кавитационным свойствам чистого глицерина – жидкости, обладающей «выдающимися» физическими свойствами: высоким модулем объемной упругости (4100...4300 МПа), большой кинематической вязкостью (700 сСт при температуре $t^0 \text{ C} = 20^0 \text{ C}$) и низкой упругостью насыщенных паров ($p_{\text{н.п.}} \approx 0$ кПа при $t^0 \text{ C} = 20^0 \text{ C}$). Его коэффициент поверхностного натяжения ($\sigma = 0,067 \text{ Н/м}$) близок к коэффициенту поверхностного натяжения дистиллированной воды ($\sigma = 0,0727 \text{ Н/м}$) и более чем в два раза превышает коэффициент поверхностного натяжения керосина ($\sigma = 0,027 \text{ Н/м}$).

Техника проведения экспериментальных исследований

Среди ранее выполненных экспериментальных исследований разреженного состояния воды необходимо выделить работу Бертоле (Bertholet M., термодинамический метод с использованием стеклянного и стального капилляров, 1850 г.), две работы Винсента

(Viincent R.S., растяжение стального сильфона, заполненного жидкостью, 1943 г. ; гидростатический метод с использованием вязкостного тонометра, 1943 г.), а также работу Бриггса (Briggs L.J., использование перегретого водяного пара как средства измерения разрежения в жидкости, 1955 г.).

Для исследования кавитационных свойств жидкостей авторами статьи была создана экспериментальная установка [6], принципиальная схема которой представлена на рис. 3.

При рассмотрении кавитационных свойств жидкости по умолчанию принято, что разрежение в исследуемой жидкости проводится в условиях ее прилипания к твердой поверхности (доньшку поршня гидроцилиндра и крышке кавитационной камеры), обусловленное их смачиваемостью.

Вакуум в кавитационной камере 3 создается вакуумным поршневым насосом 2 с пневмоприводом 1. Кавитационная камера насажена на поршневую полость насоса и представляет собой толстостенную стеклянную трубку с внутренним диаметром $d_k = 12$ мм и длиной $h = 580$ мм. При одновременном включении соленоидов S2 и S3 пневматического и гидравлического распределителей, начинается прямой ход поршня вакуумного насоса и заполнение кавитационной камеры исследуемой жидкостью. Ускоренное заполнение кавитационной камеры из питательного бака 13 происходит при полностью открытом дросселе 9. Вытеснение жидкости из кавитационной камеры в питательный бак происходит через обратный клапан 10 линии байпаса при обратном ходе поршня (выключение соленоидов S2 и S3 и включение соленоида S1). В этом случае, насыщенная пузырь-

ками нерастворенного воздуха и пара жидкость, из кавитационной камеры сливается в верхнюю часть питательного бака. Выделяющиеся из пузырьков воздух и пар отводятся в атмосферу через сапун 14 или кран 15 и, частично, возвращаются в жидкость через поверхность раздела.

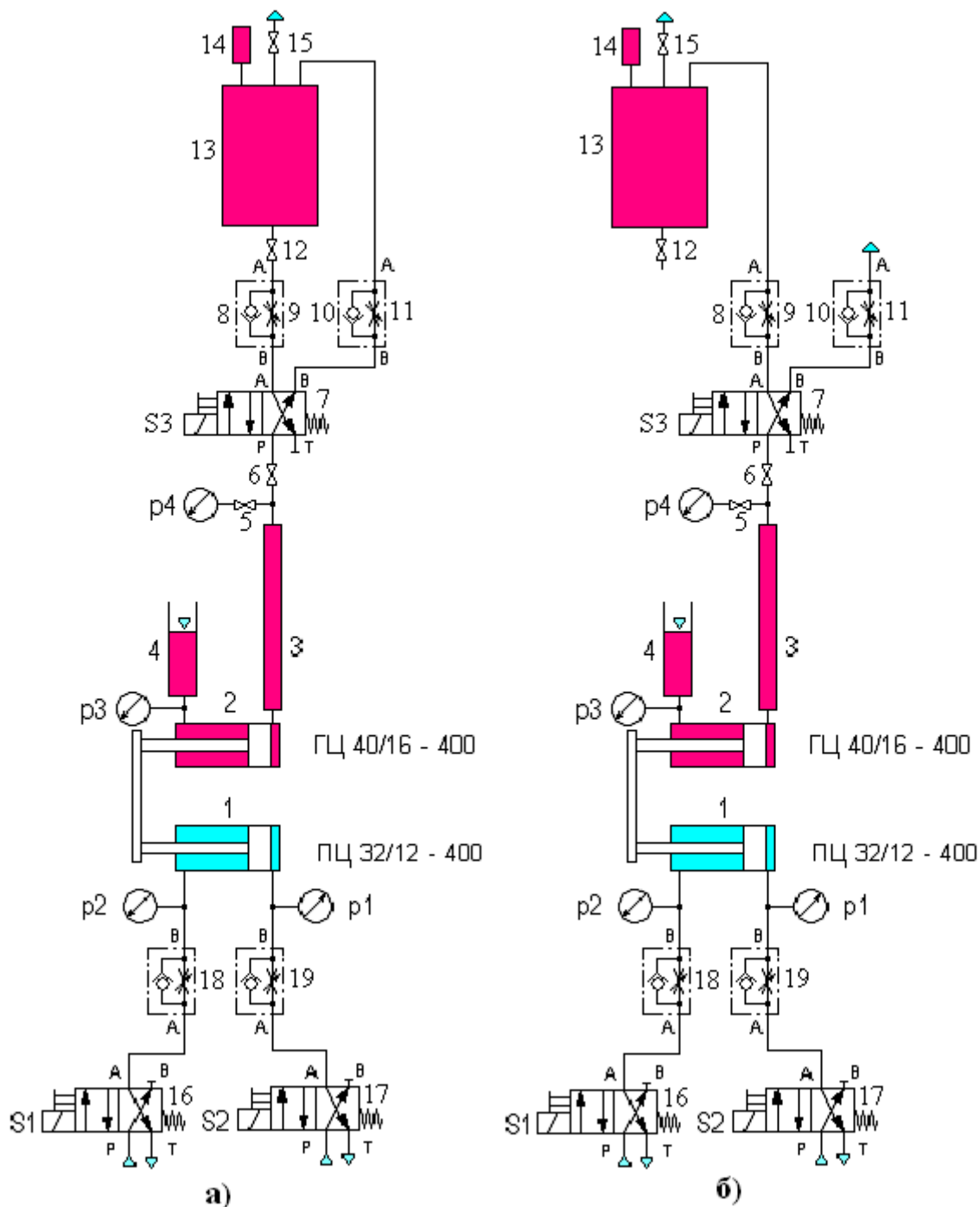


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки

Гидродинамическая дегазация жидкости происходит при заполнении кавитационной камеры через регулируемый дроссель 9, в котором происходит увеличение скоростного

напора и падение абсолютного давления. При обратном ходе поршня и быстром вытеснении жидкости из кавитационной камеры пузырьки выделившегося из жидкости не растворенного и растворенного воздуха отводятся в питательный бак.

Скорость процесса вакуумирования жидкости в кавитационной камере регулируется дросселем 9, установленным в гидравлической линии, и дросселем 19 пневмопривода вакуумного насоса. Уровень разрежения в кавитационной камере p_4 и, соответственно, абсолютное давление в жидкости $p_0 = p_{\text{ат}} - p_4$, измеряется прецизионным вакуумметром класса точности 0,25.

Скорость вытеснения жидкости из кавитационной камеры, влияющая на эффективность отвода в питательный бак выделившихся из жидкости пузырьков воздуха, настраивается регулируемым дросселем 18 пневмопривода. В целях предотвращения подсоса воздуха через уплотнения гидроцилиндра вакуумного насоса в кавитационную камеру при ее вакуумировании, установлен бак гидравлического затвора 4, заполняемый исследуемой жидкостью.

Общий вид экспериментальной установки представлен на photographиях рис. 4, 5.

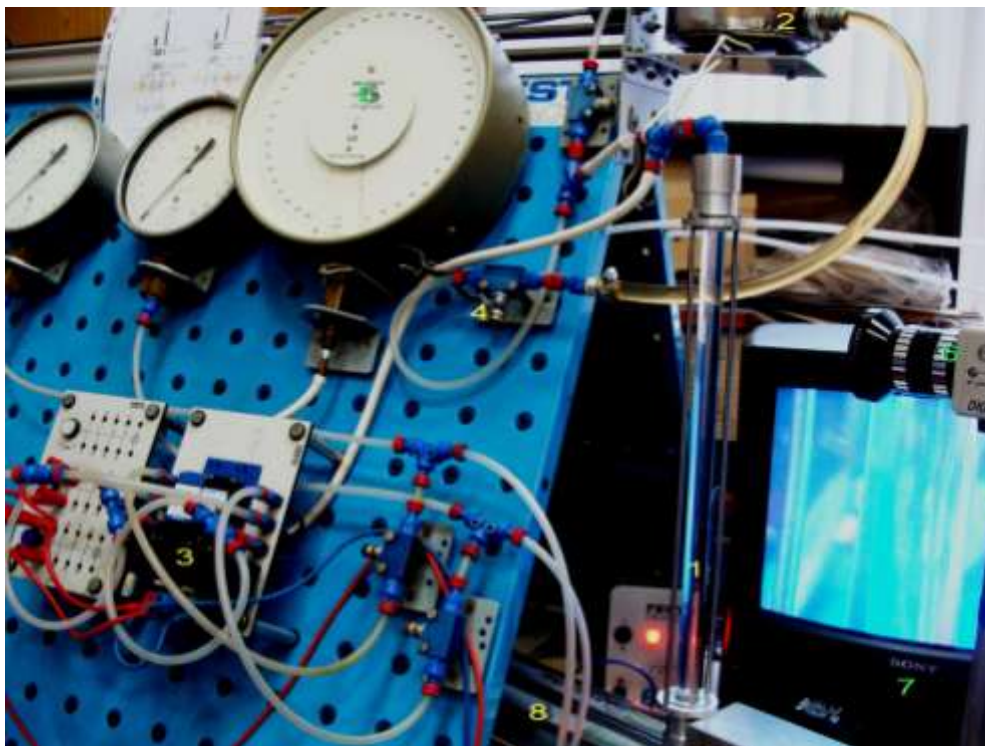


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

Видеосъемка процессов гидродинамической дегазации и гидростатической кавитации в жидкости производилась цифровой видеокамерой с широкофокусным объективом и записывалась на видеомэгнитофон. В процессе обработки информация оцифровывалась и анализировалась на компьютере.

На рис. 5 показан достигнутый в процессе эксперимента уровень вакуума в керосине.



Рис. 5. Результат измерения разрежения в керосине

Для удаления из жидкости нерастворенного и растворенного воздуха использовались нижеследующие технологии дегазации.

А. Гидростатическая поверхностная дегазация (рис. 3б).

При закрытом кране 15, включенных соленоидах S2 и S3 и открытом дросселе 9 вакуумный насос 2 длительное время создавал над поверхностью жидкости в питательном баке 13 разрежение. При выключенном соленоиде S3 и быстром обратном ходе поршня вакуумного насоса выделяющийся из жидкости воздух вытеснялся в атмосферу через обратный клапан 10.

Б. Гидродинамическая дегазация (рис. 3а).

При включенных соленоидах S2 и S3, в процессе заполнения кавитационной камеры на дросселе 9 возникала кавитация с активной генерацией паро - воздушных пузырьков. Вследствие того что на выходе дросселя и в кавитационной камере существовал вакуум, находящиеся в жидкости пузырьки, не смыкаясь, всплывали, заполняли верхнюю часть объема камеры и частично увлекались потоком в поршневую полость гидроцилиндра вакуумного насоса. При быстром обратном ходе поршня и выключенном соленоиде S3, выделившиеся из жидкости воздух и пар вытеснялись в верхнюю часть питательного бака через обратный клапан 10. В соответствии с геометрией гидроцилиндра вакуумного насоса, полный объем его поршневой полости составлял 0,502 литра, а объем жидкости в пи-

тательном баке – 2,5 литра. Таким образом, за 10 циклов гидродинамической дегазации происходил двухкратный обмен жидкости в питательном баке, а за 25 циклов – пятикратный.

В. Разрывная дегазация (рис. 3а).

При закрытых вакуумных кранах 5 и 6, в конце хода поршня вакуумного насоса в кавитационной камере и в поршневой полости гидроцилиндра создавалось глубокое разрежение. После открытия крана 6 на дросселе 9 происходил активный кавитационный процесс с интенсивным выделением пузырьков растворенного и нерастворенного воздуха, которые при ускоренном обратном ходе поршня вакуумного насоса вытеснялись через обратный клапан 10 байпаса в верхнюю часть питательного бака.

Магистраль, соединяющие питательный бак и кавитационную камеру, были выполнены из прозрачных пластиковых трубок, что позволило визуально контролировать наличие или отсутствие пузырьков в вытесняемой из кавитационной камеры жидкости.

При анализе результатов экспериментальных исследований под *дегазированной жидкостью* рассматривалась жидкость, подверженная гидродинамической дегазации на уровне, соответствующем пятикратному прохождению всего объема жидкости в баке через дроссель. Это соответствовало 25 циклам гидродинамической дегазации. По визуальным наблюдениям, в такой жидкости полностью отсутствовали видимые невооруженным глазом пузырьки не растворенного воздуха.

Результаты экспериментальных исследований

Перед началом процесса вакуумирования закрытой кавитационной камеры, поршень вакуумного насоса выводился в свое крайнее положение, обеспечивающее минимальный объем поршневой полости гидроцилиндра 2 (рис. 3а). Трубка Бурдона, используемая в качестве чувствительного элемента вакуумметра, имела значительный объем своей внутренней полости, сравнимый с объемом кавитационной камеры. В силу этого, наибольшая глубина разрежения в жидкости при гидростатической кавитации достигалась только после 4...6 циклов вакуумирования кавитационной камеры при закрытом кране 6..

Очередной цикл вакуумирования начинался после того, как кран 5 закрывался и трубка Бурдона отключалась от кавитационной камеры. Вакуумметр подключался к кавитационной камере только после полного окончания процесса вакуумирования, когда поршневая полость вакуумного насоса достигала своего наибольшего объема. В процессе исследований атмосферное давление постоянно контролировалось прецизионным барометром – anerоидом класса 0,25.

Результаты экспериментальных исследований кавитационных свойств технических жидкостей при постоянной температуре $t^0 \text{ C} = 20^0 \text{ C}$ сведены в табл. 2.

Таблица 2 Результаты экспериментальных исследований

Исследуемая жидкость	Давление насыщенных паров, кПа	Абсолютное давление, кПа			Разряжение, кПа		
		Циклы дегазации			Циклы дегазации		
		0	10	25	0	10	25
Дистиллированная вода	2,34	5,0	4,10	3,70	93,10	94,0	94,40
Морская вода	2,50	5,20	4,30	3,90	92,90	93,80	94,20
Насыщенный раствор NaCl	2,80	6,00	4,80	4,10	92,10	93,30	94,0
Глицерин 99 %	0,05	3,20	3,00	2,80	94,90	95,10	95,30
Водный раствор глицерина 51 / 49 % (по массе)	2,90	4,90	4,00	3,60	93,20	94,10	94,50
Минеральное масло МГЕ 10	0,60	4,0	3,80	3,50	94,1	94,30	94,60
Керосин ТС1	0,67	5,50	5,00	4,30	92,60	93,10	93,80

Как было упомянуто выше, после 25 циклов гидродинамической дегазации, в жидкости, вытесняемой из поршневой полости гидроцилиндра вакуумного насоса, полностью отсутствовали наблюдаемые невооруженным глазом пузырьки нерастворенного воздуха. В этом случае можно полагать, что после пятикратного прохождения всего объема жидкости в баке через дроссель в режиме гидродинамической дегазации, в ней присутствовал только растворенный воздух.

Исключение составил глицерин 99 %, для которого, в силу его большой вязкости и отсутствия естественной флотации пузырьков, процесс гидродинамической дегазации практически не реализуем. Поэтому в глицерине постоянно присутствовало значительное количество мелкодисперсных пузырьков нерастворенного воздуха, влияющих на величину достижимого в жидкости разрежения. Графический анализ результатов экспериментальных исследований представлен лучом абсолютных давлений (рис. 6б).

Остаточный объем жидкости в поршневой полости гидроцилиндра вакуумного насоса (рис. 6а), после окончания процесса вакуумирования кавитационной камеры, равен ее объему $W_k = 0,785d_k^2h$. Объем газовой полости гидроцилиндра вакуумного насоса W_r определяется из соотношения $W_r = 0,785d_p^2S - W_k$, где d_p – диаметр поршня; S – полный ход поршня.

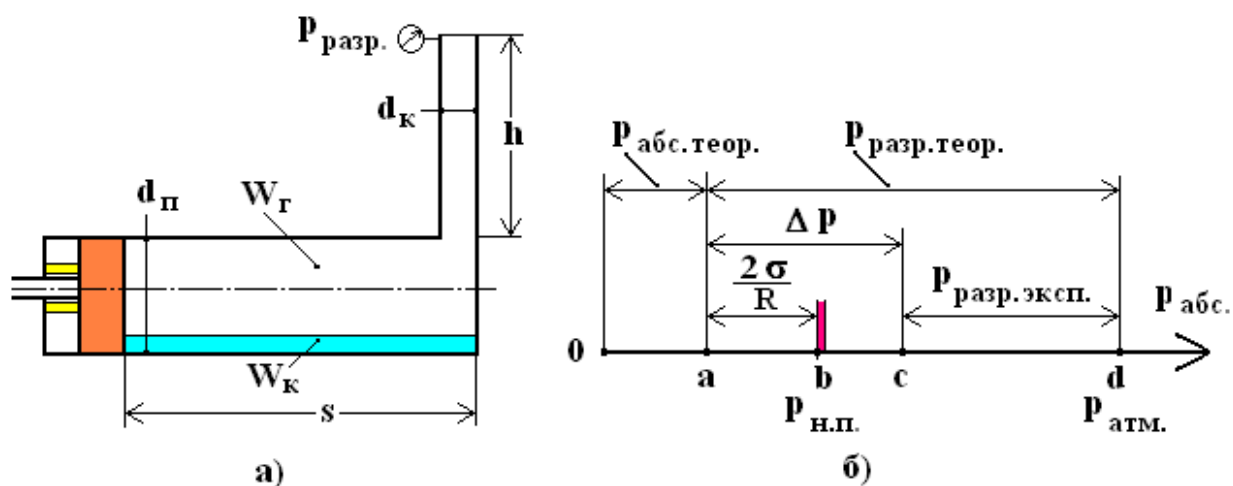


Рис. 6. Графический анализ результатов экспериментальных исследований

Теоретическое значение величины разрежения в жидкости p_0 может быть меньше суммарного давления газа и пара p внутри паро-воздушного пузырька на величину добавленного давления $p_\sigma = 2\sigma/R$, определяемого коэффициентом поверхностного натяжения жидкости. В табл. 3 представлены расчетные значения p_σ для воды и керосина в функции радиуса пузырька R .

Таблица 3 Расчетные значения добавленного давления p_σ .

$R, м$	$0,05 \times 10^{-3}$	$0,08 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,15 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$
$p_\sigma, кПа$ (вода)	2,92	1,82	1,46	0,973	0,292
$p_\sigma, кПа$ (керосин)	1,08	0,67	0,54	0,36	0,11

Как следует из данных табл. 3, величина добавленного давления p_σ при малых значениях радиуса пузырька R может иметь тот же порядок, что и абсолютное давление в жидкости, окружающей воздушный пузырек.

Из рис. 6б следует, что полученные экспериментальные значения максимально достижимого разрежения в жидкости $p_{разр. эксп.}$ меньше его теоретически возможного значения $p_{разр. теор.}$ на величину Δp . Можно предположить, что это несоответствие определяется двумя основными факторами:

- влияние оставшихся в жидкости невидимых невооруженным глазом микропузырьков нерастворенного воздуха после ее гидродинамической дегазации;
- ослабление межмолекулярных связей в *растворителе* из-за влияния на них *растворимого вещества* (твердого, жидкого или газообразного) и, как следствие этого, повышением давления насыщенных паров.

Сравнительная оценка кавитационных свойств исследованных технических жидкостей представлена на луче абсолютного давления $p_{абс}$ (рис. 7).

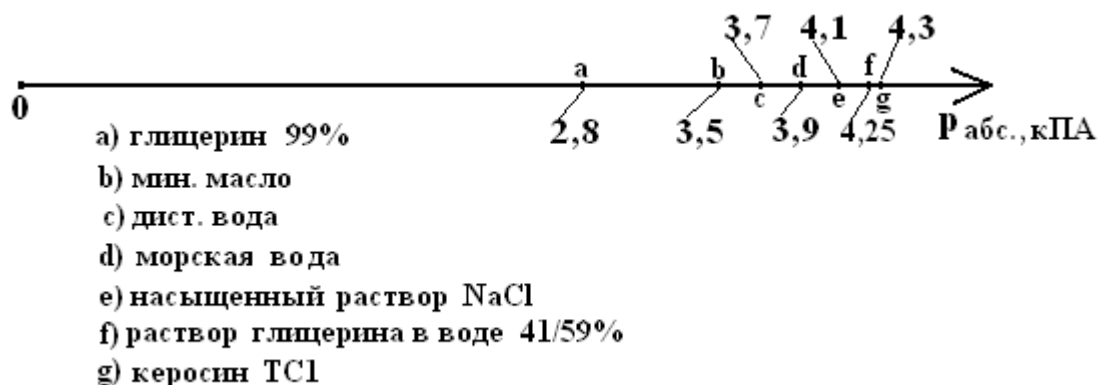


Рис.7. Кавитационные свойства технических жидкостей

Анализ данных рис. 7 показывает, что по своим кавитационным свойствам вода занимает среднее положение между глицерином и керосином (точка «с»). Принимая за основу минимально достижимое абсолютное давление в воде $p_{абс. воды}$, введем понятие относительной прочности жидкости на разрыв $K_{разр} = p_{абс. воды} / p_{абс. жидк.}$

С учетом соотношения $p_{разр} = p_{атм} - p_{абс}$, получим:

- для глицерина 99 % : $p_{разр} = 95,3$ кПа; $p_{абс} = 2,80$ кПа; $K_{разр.} = 1,32$;
- для дистиллированной воды: $p_{разр} = 94,4$ кПа; $p_{абс} = 3,70$ кПа; $K_{разр.} = 1$;
- для керосина: $p_{разр.} = 93,8$; $p_{абс} = 4,30$ кПа ; $K_{разр} = 0,86$.

К сожалению, поместить в статью фрагменты видеозаписи кавитирующего потока жидкости при ее гидродинамической дегазации и развития в жидкости кавитации при вакуумировании закрытой кавитационной камеры не представляется возможным. Ниже приводится краткое описание этих процессов.

А. Дистиллированная вода.

- В процессе гидродинамической дегазации, при заполнении кавитационной камеры кавитирующей жидкостью, наблюдалось большое количество пузырьков нерастворенного воздуха диаметром 1...3 мм.
- Пузырьки скапливались в ограниченном объеме под мениском жидкости в кавитационной камере и частично увлекались потоком в поршневую полость гидроцилиндра.
- Трение в уплотнениях вызвало прерывистость движения поршня и скачкообразные увеличения вакуума в кавитационной камере. Это, в свою очередь, приводило к спонтанному и кратковременному выделению во всем объеме камеры паровых микропузырьков и помутнению потока.
- В объеме помутневшего потока сохранялись пузырьки не растворенного воздуха;

- По мере увеличения циклов гидродинамической дегазации диаметр пузырьков уменьшался.
- После 25 циклов гидродинамической дегазации, в конце процесса вытеснения жидкости из кавитационной камеры, наблюдаемые невооруженным глазом пузырьки не растворенного воздуха отсутствовали.
- При вакуумировании жидкости в закрытой кавитационной камере, в начале процесса наблюдалось выделение в объеме жидкости мелкодисперсных пузырьков, после чего следовал отрыв жидкости от крышки камеры и ее быстрое опорожнение.

Б. Морская вода.

Существенные отличия от аналогичных процессов в дистиллированной воде не обнаружены.

В. Насыщенный раствор NaCl в воде.

Существенные отличия от аналогичных процессов в дистиллированной воде не обнаружены. Диаметр пузырьков увеличился до значений 2 ...4 мм.

Г. Глицерин 99 %.

- Из-за большой вязкости глицерина (700 сСт) и малой упругости его насыщенных паров (0,05 кПа) гидродинамическая дегазация была затруднена, а процесс заполнения кавитационной камеры глицерином имел характерные особенности. В начале процесса гидродинамической дегазации, когда весь объем камеры был заполнен жидкостью, наблюдалось выделение из глицерина мелких пузырьков воздуха диаметром 1 мм. В дальнейшем, глицерин стекал по внутренней стенке кавитационной камеры в виде тонкой, насыщенной мелкими пузырьками пленки, а просвет сечения камеры заполнялся крупными кавернами диаметром 8 ...10 мм.
- По мере увеличения разрежения, образовавшиеся каверны превращались в непрерывную гирлянду слипшихся крупных пузырей, напоминающую сжатую виток к витку пружину, при этом часть пузырей выдавливалась из гирлянды и уносилась пристеночным потоком жидкости.
- Вытеснение глицерина из кавитационной камеры происходило значительно быстрее ее заполнения через дроссель.
- После пятикратной гидродинамической дегазации в глицерине сохранялось большое количество мелкодисперсных пузырьков, не подверженных естественной флотации.
- В начале процесса вакуумирования глицерина в закрытой кавитационной камере выделялись мелкодисперсные пузырьки нерастворенного воздуха, после чего следовал отрыв жидкости от крышки кавитационной камеры и ее быстрое опорожнение.

Д. Керосин.

- Процесс гидродинамической дегазации происходил очень активно: наблюдалось интенсивное выделение микропузырьков нерастворенного воздуха.
- Мелкодисперсные пузырьки насыщали объем жидкости под мениском, активно перемешивались, не опускались под мениск ниже трех диаметров кавитационной камеры и, в отличие от дистиллированной воды, практически, не увлекались потоком в поршневую полость гидроцилиндра.

По результатам компьютерного анализа видеозаписей можно сделать следующие выводы:

- Подтверждено существование зависимости (4), согласно которой, при прочих равных условиях, радиус паро-воздушного пузырька определяется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости и упругостью ее насыщенных паров.
- В маловязких жидкостях пузырьки активно заполняют объем жидкости под мениском и частично уносятся потоком в поршневую полость гидроцилиндра вакуумного насоса.
- При вытеснении жидкости из кавитационной камеры по завершению процесса гидродинамической дегазации, пузырьки нерастворенного воздуха не успевают смыкаться при снятии разрежения и выносятся потоком в верхнюю часть питательного бака.
- В очень вязкой жидкости (глицерин), в виду отсутствия естественной флотации пузырьков и малой скорости потока в дросселе, пузырьки имеют вид больших каверн и «слипаются» в гирлянды.
- Пятикратной гидродинамической дегазации объема жидкости в питательном баке достаточно для удаления пузырьков нерастворенного воздуха, наблюдаемых невооруженным глазом.
- В очень вязкой жидкости гидродинамическая дегазация методом вакуумирования не реализуется.

В табл. 4 представлено влияние кратности гидродинамической дегазации на значение коэффициента допустимого абсолютного давления в жидкости при ее вакуумировании $K_{\text{доп}} = p_{\text{абс. доп.}}/p_{\text{н.п.}}$.

Как следует из данных табл. 4, у легко испаряющихся жидкостей ($p_{\text{н.п.}} = 2,3 \dots 3,0$ кПа) величина коэффициента допустимого абсолютного давления $K_{\text{доп}}$ лежит в пределах $K_{\text{доп}} = 1,3 \dots 1,7$.

У трудно испаряющихся жидкостей при *нормальных технических условиях* ($t^{\circ} \text{C} = 20^{\circ} \text{C}$), к которым относятся глицерин, минеральное масло и керосин, значение коэффициента $K_{\text{доп}}$ значительно больше ($K_{\text{доп}} = 5,83 \dots 56$).

Таблица 4 Значения коэффициента допустимого абсолютного давления

Исследуемая жидкость	$K_{\text{доп}} = p_{\text{абс. доп.}} / p_{\text{н.п.}}$		
	Кратность дегазации		
	0	2,5	5
Дистиллированная вода	2,14	1,75	1,58
Морская вода	2,08	1,72	1,56
Насыщенный раствор NaCl	2,0	1,60	1,37
Глицерин 99 %	64	60	56
Раствор глицерина в воде 49/51%	2,08	1,92	1,70
Керосин ТС1	8,2	7,46	6,42
Минеральное масло МГЕ 10	6,7	6,3	5,83

Общие выводы по результатам исследования

- 1) Величина допустимого разряжения в реальной, специально не подготовленной жидкости, определяется количеством *нерастворенного* в ней воздуха.
- 2) Полный цикл гидродинамической дегазации жидкости методом вакуумирования кавитационной камеры, в среднем, на 30 % уменьшает величину максимально достижимого в жидкости абсолютного давления.
- 3) Величина допустимого разряжения в дегазированной жидкости определяется, в первую очередь, количеством *растворенного* в ней воздуха.
- 4) Величина допустимого абсолютного давления, при гидростатическом вакуумировании *легко испаряющейся* жидкости, в среднем, в полтора раза превышает давление ее насыщенных паров.
- 5) Величина допустимого абсолютного давления, при гидростатическом вакуумировании *трудно испаряющейся* при нормальных технических условиях жидкости, может от пяти до пятидесяти раз превышать давление ее насыщенных паров.
- 6) В вязкой жидкости ее гидродинамическая дегазация методом вакуумирования кавитационной камеры не реализуема. Из-за отсутствия естественной флотации мелких пузырьков; оставшееся в жидкости большое количество нерастворенного воздуха существенно повышает уровень минимально допустимого в ней абсолютного давления.
- 7) Уровень допустимого абсолютного давления в *растворе* больше того же показателя у *растворителя*. Предположительно, растворенное в жидкости вещество (твердое, жидкое или газообразное) ослабляет межмолекулярные связи растворителя и увеличивает давление его насыщенных паров.
- 8) Минимально допустимое значение абсолютного давления в глицерине в пятьдесят раз превышает давление его насыщенных паров, что обусловлено большим количеством остаточных пузырьков нерастворенного воздуха, не удаляемых в процессе гидродинамической дегазации.

- 9) Из исследованных технических жидкостей, наибольшей прочностью на разрыв обладает чистый глицерин ($K_{\text{разр.}} = 1,32$), наименьшей прочностью – керосин ($K_{\text{разр.}} = 0,86$).
- 10) Дистиллированная вода занимает промежуточное положение между ними ($K_{\text{разр.}} = 1$).
- 11) Твердое растворимое вещество (соль NaCl) уменьшает прочность на разрыв растворителя (воды) на 10 %.
- 12) Жидкое растворимое вещество (глицерин) в водном растворе 49/51 % уменьшает прочность на разрыв растворителя на 13 %.

Список литературы

1. Пирсол И.С. Кавитация: пер. с англ. М.: Мир, 2012. 98 с.
2. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А. Физика и химия кавитации. М.: Наука, 2008. 226 с.
3. Окслер Г. Что такое кавитация? // Арматуростроение. 2012. № 3 (78). С. 70-73.
4. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация: пер. с англ. М.: Мир, 1974. 687 с.
5. Маргулис М.А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. 2000. № 3 (170). С. 263-287. DOI: [10.3367/UFNr.0170.200003c.0263](https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200003c.0263)
6. Пильгунов В.Н. Исследование разрывной прочности минерального масла // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 5. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/370692.html> (дата обращения 01.02.2016).
7. Яворский Б.М., Датлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. 512 с.
8. Акопян В.Б., Альков С.В., Бамбура М.В., Ершов Ю.А. Поверхность кавитирующего пузырька // Машиностроитель. 2015. Т. 84, вып. 12. С. 10-15.
9. Алимов М.А., Воробьев Д.А., Хвесюк В.И. Модель воздействия кавитационного пузырька на стенку канала в приближении точечного взрыва в несжимаемой жидкости // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 07. С. 309-324. DOI: [10.7463/0712.0435175](https://doi.org/10.7463/0712.0435175)
10. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Лэхи Р.Т., Нигматулин Р.И., Талейархан Р.П., Топорков Д.Ю. Эволюция возмущений сферической формы кавитационного пузырька при его сверхсжатии // Вестник Башкирского университета. 2012. Т. 17, № 3. С. 1180 -1195. Режим доступа: <http://bulletin-bsu.com/arch/2012/3/1-1/> (дата обращения 01.02.2016).
11. Ni B.Y., Zhang A.M., Wu G.X. Numerical and Experimental Study of Bubble Impact on a Solid Wall // Journal of Fluids Engineering. 2015. Vol. 137, iss. 3. DOI: [10.1115/1.4028798](https://doi.org/10.1115/1.4028798)
12. Ковалев А.А. Моделирование кавитационного воздействия на рабочую поверхность изделия, эксплуатируемого в гидродинамической среде // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. С. 25-36. DOI: [10.7463/1113.0623525](https://doi.org/10.7463/1113.0623525)

13. Tomita Y., Robinson P.B., Tong R.P., Blake J.R. Growth and collapse of cavitation bubbles near a curved rigid boundary // Journal of Fluid Mechanics. 2002. Vol. 466. P. 259-283. DOI: [10.1017/S0022112002001209](https://doi.org/10.1017/S0022112002001209)
14. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 271 с.
15. Леонов Г.В., Савина Е.И. Информационное моделирование кавитационных процессов, инициированных ультразвуковыми осцилляторами // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials (EDM'2006). Новосибирск: НГТУ, 2006. Режим доступа: http://ультразвук.net/downloads/edm06/modeling_rus.pdf (дата обращения 01.02.2016).
16. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing // Electronic Journal Technical Acoustics. 2011. No. 9. Режим доступа: <http://www.ejta.org/en/ashokkumar1> (дата обращения 01.02.2016).
17. Margulis M.A. Sonochemistry as a New Promising Area of High Energy Chemistry // High Energy Chemistry. 2004. Vol. 38, iss. 3. P. 135-142. DOI: [10.1023/B:HIEC.0000027648.69725.98](https://doi.org/10.1023/B:HIEC.0000027648.69725.98)
18. Маргулис М.А. О механизме возникновения свечения и электризации при течении жидкостей в узком канале / под ред. М.А. Маргулиса, В.Н. Пильгунова // Журнал физической химии. 2009. Т. 83, № 10. С. 1975-1979.
19. Маргулис М.А., Пильгунов В.Н. Механизм свечения и электризации жидкостей при течении в узких каналах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. Физика. 2010. № 1. С. 64-79. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-svecheniya-i-elektrizatsii-zhidkostey-pri-techenii-v-uzkih-kanalah> (дата обращения 01.02.2016).

Some Cavitation Properties of Liquids

K.D. Efremova^{1,*}, V.N. Pil'gunov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: hydrodynamic degassing, hydrostatic cavitation, achievable liquid depression, tensile strength of liquid, hydraulic vacuum pump provided by pneumatic drive

Cavitation properties of liquid must be taken into consideration in the engineering design of hydraulic machines and hydro devices when there is a possibility that in their operation an absolute pressure in the liquid drops below atmospheric one, and for a certain time the liquid is in depression state. Cold boiling, which occurs at a comparatively low temperature under a reduced absolute pressure within or on the surface of the liquid is regarded as hydrostatic cavitation if the liquid is stationary or as hydrodynamic cavitation, if the liquid falls into conditions when in the flow cross-section there is a sharply increasing dynamic pressure and a dropping absolute pressure.

In accordance with the theory of cavitation, the first phase of cavitation occurs when the absolute pressure of the degassed liquid drops to the saturated vapour pressure, and the air dissolved in the liquid, leaving the intermolecular space, is converted into micro-bubbles of combined air and becomes a generator of cavitation “nuclei”. A quantitative estimate of the minimum allowable absolute pressure in a real, fully or partially degassed liquid at which a hydrostatic cavitation occurs is of practical interest.

Since the pressure of saturated vapour of a liquid is, to a certain extent, related to the forces of intermolecular interaction, it is necessary to have information on the cavitation properties of technical solutions, including air solution in a liquid, as a solute may weaken intermolecular bonds and affect the pressure value of the saturated solvent vapour. In the experiment to carry out vacuum degassing of liquids was used a hydraulic air driven vacuum pump.

The paper presents hydrostatic and hydrodynamic degassing liquid processes used in the experiment.

The experimental studies of the cavitation properties of technical liquids (sea and distilled water, saturated NaCl solution, and pure glycerol and as a 49/51% solution in water, mineral oil and jet fuel) enabled us to have an quantitative estimate of the absolute pressure in the allowable technical liquids and solutions, its dependence on the saturated vapour pressure, as well as to define the influence of a degree of the hydrodynamic degassing of liquid and the amount of its solute on the liquid tensile strength.

The paper gives a comparative assessment of cavitation properties of liquids. When studying the cavitation properties of solutions it has been found that a level of the allowable absolute pressure in a solution exceeds that of in the solvent. It is suggested that the dissolved solid, liquid or gaseous substances weaken the intermolecular bonds of the solvent and increase the pressure of its saturated vapour.

References

1. Pearsall I.S. *Cavitation (Mechanics Engineering Monograph)*. Mills and Boon, 1972. 80 p. (Rus. ed.: Pearsall I.S. *Kavitatsiya*. Moscow, Mir Publ., 2012. 98 p.).
2. Smorodov E.A., Galiakhmetov R.N., Il'gamov M.A. *Fizika i khimiya kavitatsii* [Physics and chemistry of cavitation]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 226 p. (in Russian).
3. Oksler G. What is cavitation? *Armaturestroenie*, 2012, no. 3, pp. 70-73. (English version of journal: *Valve World*, 2012, no. 3, pp. 75.).
4. Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F.G. *Cavitation*. New York, McGraw-Hill, 1970. 621 p. (Rus. ed.: Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F.G. *Kavitatsiya*. Moscow, Mir Publ., 1974. 687 p.).
5. Margulis M.A. Sonoluminescence. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2000, no. 3, pp. 263-287. (English version of journal: *Physics-Uspekhi*, 2000, no. 43, pp. 259-282. DOI: [10.1070/PU2000v043n03ABEH000455](https://doi.org/10.1070/PU2000v043n03ABEH000455)).
6. Pil'gunov V.N. Research of mineral oil bursting strength. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 5. DOI: [10.7463/0512.0370692](https://doi.org/10.7463/0512.0370692) (in Russian).
7. Yavorsky B.M., Detlaf A.A. *Handbook of Physics*. Central Books Ltd, 1973. 965 p. (Rus. ed.: Yavorsky B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 512 p.).
8. Akopyan V.B., Al'kov S.V., Bambura M.V., Ershov Yu.A. The surface of the cavitating bubble. *Mashinostroitel' = Mechanician*, 2015, vol. 84, iss. 12, pp. 10-15. (in Russian).
9. Alimov M.A., Vorob'ev D.A., Khvesyuk V.I. Model of the impact of a cavitation bubble on the channel wall in the approximation of point explosion in an incompressible fluid. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 07, pp. 309-324. DOI: [10.7463/0712.0435175](https://doi.org/10.7463/0712.0435175) (in Russian).
10. Aganin A.A., Il'gamov M.A., Lekhi R.T., Nigmatulin R.I., Taleiarkhan R.P., Toporkov D.Yu. Evolution of perturbations of spherical shape of cavitation bubble during its supercompression. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of Bashkir University*, 2012, vol. 17, no. 3, pp. 1180 -1195. Available at: <http://bulletin-bsu.com/arch/2012/3/1-1/> , accessed 01.02.2016. (in Russian).
11. Ni B.Y., Zhang A.M., Wu G.X. Numerical and Experimental Study of Bubble Impact on a Solid Wall. *Journal of Fluids Engineering*, 2015, vol. 137, iss. 3. DOI: [10.1115/1.4028798](https://doi.org/10.1115/1.4028798)
12. Kovalev A.A. Simulation of a cavitation attack on the working surface of a work-piece operated in a hydro-dynamic medium. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science*

- and Education of the Bauman MSTU, 2013, no. 11, pp. 25-36. DOI: [10.7463/1113.0623525](https://doi.org/10.7463/1113.0623525) (in Russian).
13. Tomita Y., Robinson P.B., Tong R.P., Blake J.R. Growth and collapse of cavitation bubbles near a curved rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, vol. 466, pp. 259-283. DOI: [10.1017/S0022112002001209](https://doi.org/10.1017/S0022112002001209)
 14. Sirotiyuk M.G. *Akusticheskaya kavitatsiya* [Acoustic cavitation]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 271 p. (in Russian).
 15. Leonov G.V., Savina E.I. Information modeling of cavitation processes, initiated by ultrasonic oscillators. *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials (EDM'2006)*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2006. Available at: http://ультразвук.net/downloads/edm06/modeling_rus.pdf, accessed 01.02.2016. (in Russian).
 16. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing. *Electronic Journal Technical Acoustics*, 2011, no. 9. Available at: <http://www.ejta.org/en/ashokkumar1>, accessed 01.02.2016.
 17. Margulis M.A. Sonochemistry as a New Promising Area of High Energy Chemistry. *High Energy Chemistry*, 2004, vol. 38, iss. 3, pp. 135-142. DOI: [10.1023/B:HIEC.0000027648.69725.98](https://doi.org/10.1023/B:HIEC.0000027648.69725.98)
 18. Margulis M.A.; Pil'gunov V.N., ed. About mechanism of occurrence of luminescence and electrification during flow of fluids in a narrow channel. *Zhurnal fizicheskoi khimii = Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2009, vol. 83, no. 10, pp. 1975-1979. (in Russian).
 19. Margulis M.A., Pil'gunov V.N. Mechanism of luminescence and electrification of fluids during flow in narrow channels. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki. Fizika = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural science. Physics*, 2010, no. 1, pp. 64-79. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-svecheniya-i-elektrizatsii-zhidkostey-pri-techenii-v-uzkih-kanalah>, accessed 01.02.2016. (in Russian).