

ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

В.И. Барышев, К.К. Лайко

Рассмотрены причины и последствия снижения прочности жидкости. Приведен краткий аналитический обзор экспериментальных работ по описанию явления кавитации и исследованию ее первой стадии – образования несплошности в виде газового (парогазового) пузырька. Освещены и проанализированы результаты собственных исследований, особое внимание при этом уделено методике постановки экспериментов.

Ключевые слова: кавитация, прочность жидкости, несплошность жидкости, рабочая жидкость, давление разрыва, отрицательное давление, газовыделение, масло, вода.

1. Понятие «прочность жидкости»

Прочность любого материала определяется связями между его молекулами. Рабочие жидкости гидропривода представляют собой многокомпонентную смесь, состоящую из базового масла (основы), эмульсии (воды и масляных фракций, отличных от базовой, в масле) и суспензии (механических частиц в масле), что определяет относительную прочность как связь между молекулами разных материалов. Критерием оценки сдвиговой прочности жидкости служит вязкость. Для оценки разрывной (объемной) прочности однозначного критерия нет, поэтому в литературе введен термин «прочность жидкости», заранее подразумевающий разрывную (объемную) прочность. Таким образом, следует определить **прочность жидкости** как способность сохранять жидкостью объем в заданных пределах в определенных условиях при воздействии растягивающих нагрузок из-за увеличения замкнутого объема и (или) локального снижения давления. Проявлением снижения прочности служит повышение предрасположенности к выделению в объеме жидкости паровых или парогазовых пузырьков, т. е. начальная стадия кавитации – острой проблемы современной техники.

2. Причины и последствия снижения жидкостью прочности

Состояние рабочих жидкостей гидросистем различного назначения сегодня оценивается основными параметрами: вязкостью, давлением насыщенных паров, кислотным числом, концентрацией воды и механических примесей. Методы и средства оценки достаточно отработаны, давая высокую достоверность результатов. Однако до 70 % отказов [1, 2] гидросистем происходит ввиду нарушения их эксплуатационных функций (смазывания, герметизации, охлаждения, сглаживания пульсаций, передачи энергии и т. д.), которое далеко не всегда отражается критическим изменением основных параметров при критическом снижении прочности.

К основным причинам снижения прочности жидкости относят [1, 2]:

1. Увеличение замкнутого объема в поршневых насосах, возникающее ввиду высокого гидравлического сопротивления канавок сглаживания пульсации (или их отсутствия) в распределительном диске.
2. Пульсирующие, в том числе и знакопеременные нагрузки на стрелах и рычагах, управляемых гидроцилиндрами, например, при разработке разнородного грунта.
3. Отрыв потока от русла в запорно-распределительной аппаратуре ввиду малых проходных сечений, острых кромок русел и высоких скоростей течения.
4. Загрязнение рабочих жидкостей продуктами износа, окисление, обводнение и т. д.

Среди последствий снижения прочности к основным следует отнести [1, 2]:

1. Пригар, навалакивание, спайка, температурные трещины поверхностей рабочих органов гидромашин и агрегатов из-за снижения смазывающей способности рабочей жидкости (в том числе сухой контакт металлических поверхностей), что особенно важно в парах трения «поршень – опорный диск» и подшипниках скольжения.

2. Кавитация с последующим выкрашиванием, например, в торцевых распределителях поршневых и пластинчатых насосов и запорных элементах распределительной аппаратуры.

Контроль и испытания

3. Гидроабразивная эрозия и абразивный износ поверхностей из-за насыщения рабочей жидкости продуктами износа.

Приборы учета и контроля состояния гидросистем не могут фиксировать зарождение кавитации, а только свидетельствуют о ее последствиях по выходу значений температур, расходов и давлений за допустимые диапазоны, что объясняется влиянием на прочность каждого параметра. Ввод критерия прочности позволил бы оценить комплексное воздействие изменения всех основных параметров жидкости и повысить надежность техники более тщательным выбором рабочих жидкостей и разработкой эксплуатационных рекомендаций.

3. Аналитический обзор экспериментальных исследований

Техническая литература и периодические источники свидетельствуют, что экспериментальные исследования прочности жидкости начались в середине XIX века. В 1893 году явление кавитации было обнаружено на английском миноносце «Деринг», а несколькими годами позже на турбинном корабле «Турбиния»: при достижении определенной частоты вращения гребного винта ввиду разрыва потока происходило резкое падение скорости движения корабля [3]. Однако еще в 1843 году ученый Ф. Донни указал на возможность существования жидкости в некотором состоянии, которое назвал отрицательным давлением [5]. Примерно в это же время французский физик М. Бергло предложил метод измерения прочности жидкости, заключающийся в ее охлаждении в герметично запаянном капилляре, и был признан первым ученым, измерившим прочность жидкости [6].

Исследования прочности жидкости проводились и отечественными учеными. Разрыв жидкости в замкнутом объеме при его увеличении с помощью сильфона осуществил В.А. Хохлов [7], В.Е. Виноградов оценил прочность жидкости в отраженной волне отрицательного давления [8], В.Н. Пильгунов в качестве критерия предложил давление в гидроцилиндре, жестко связанном со вторым гидроцилиндром, поршневая полость которого вместе с прозрачной трубкой являлась замкнутым объемом [9].

За 170 лет ни один критерий прочности не был утвержден в качестве единственного и верного [4–7]. В табл. 1 приведены критерии прочности и их численные значения, полученные учеными для различных жидкостей. При этом условия проведения экспериментов (окружающей среды) оказались схожи (давление атмосферное, температура около 20...25 °С), а процессы – установившимися или протекающими медленно.

Значительное расхождение значений прочности воды (–0,12...–270 бар) обусловлено различными факторами, определяемыми, как правило, выбранными методами исследования.

В табл. 2 представлены сводные данные о методиках исследований. В последнем столбце «Выбор» таблицы обозначены параметры, которым было уделено главное значение при проведении собственных исследований.

Таблица 1

Значения прочности жидкостей

Жидкость	Прочность	Сущность эксперимента	Автор
Вода	–0,12 атм	Вакуумирование со свободной поверхностью в емкости	Ф. Донни
Вода	–50 атм	Охлаждение в герметично запаянной капиллярной стеклянной трубке	М. Бергло
Вода, эфир, спирт	–32 атм –35 атм –36 атм	Охлаждение в герметично запаянной капиллярной стеклянной трубке со змеевиком и зеркалом (в качестве измерительного прибора)	Дж. Майер
Керосин, веретенное 20, АМГ-10	–0,7 атм –1,6 атм –3 атм	Увеличение герметичного объема с чистой рабочей жидкостью с помощью сильфона	В.А. Хохлов
Вода	–6 атм	Отрыв двух смоченных зеркальных поверхностей	Х.М. Баджетт
Вода, ртуть	–270 атм –400 атм	Вращение запаянного капилляра (по методу О. Рейнольдса и А.М. Уордингтона)	Л. Бриггс
Вода, толуол, н-гептан	–3 МПа – –	Импульсное растяжение при отражении волны давления от преграды	В.Е. Виноградов
Минеральное масло	–35 кПа	Растяжение жидкости в замкнутом объеме гидроцилиндром	В.Н. Пильгунов

Таблица 2

Методики проведения исследований

Параметр сравнения	Ф. Донни	М. Бергло	Дж. Майер	В.А. Хохлов	Х.М. Баджетт	Л. Бриттс	В.Е. Виноградов	В.Н. Пильгунов	Выбор
Подготовка жидкости									
Вакуумирование	+							+	
Опрессовывание избыточным давлением				+					
Не проводится	+		+	+				+	+
Не оговаривается		+			+	+	+		
Ссылки на стандарты (состав жидкости)				+					
Воздух в замкнутом объеме									
Присутствует (предусмотрено методикой)	+					+			
Удаляется из объема после заполнения				+				+	+
Не допускается при заполнении				+					+
Удаляется растворением в жидкости		+	+						
Удаляется вакуумированием								+	
Не оговаривается					+		+		
Измерительные приборы									
Расположены внутри объема			+						+
Расположены вне объема	+	+		+	+	+		+	+
Не оговариваются							+		
Момент потери прочности									
Появление пузырька в трубке	+	+	+	+	+	+		+	+
Появление пузырька при съемке прибором							+		
Только по изменению показаний приборов									+
Исследуемые жидкости									
Прозрачные (в том числе чистые и вода)	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Непрозрачные (в том числе отработанные)									+
Агрессивные, опасные						+			
Методика вычислений									
Нет (результат дает прибор)			+						
По разнице температурного расширения	+	+							
По удельной нагрузке растяжения (давлению)				+	+	+		+	+
Не оговаривается							+		
Соответствие процессам в технике									
Соответствует в широком диапазоне	+			+			+	+	+
Соответствует частному случаю									+
Соответствует редкому случаю		+	+		+	+			+
Не оговаривается									

1. *Подготовка жидкости.* Для получения максимально возможной прочности жидкости достаточно часто применяется предварительное упрочнение вакуумированием или опрессовыванием. Однако при эксплуатации техники опасность представляет минимальное значение. На сегодняшний день актуальным вопросом практически всех отраслей машиностроения является возможность продления срока эксплуатации агрегатов и элементов путем оценки их состояния, в данном случае – состояния остаточной прочности жидкости, взятой непосредственно из гидросистемы и не подвергаемой стороннему воздействию, или оценка возможности применения аналогичных жидкостей по критерию прочности, т. е. искусственное изменение состояния проб исключено.

2. *Воздух в замкнутом объеме.* Исследование прочности жидкости во избежание исследования растяжения воздуха исключает его наличие в замкнутом объеме. Однако воздух может ско-

питься в зонах резкого изменения геометрии, например, в ребрах сильфона, штуцерных соединениях, коленах и т. п., чему уделяется повышенное внимание большинства авторов. Так как объемный гидропривод исключает наличие воздуха, то применение методик с некоторым объемом воздуха не представляется возможным.

3. *Измерительные приборы.* Вопрос их применения является важным и спорным, в первую очередь, из-за определяющего влияния на результаты исследований. С одной стороны, установка вакуумметра непосредственно в замкнутый объем исключила бы необходимость проведения расчетов. Однако приборы и элементы внутри замкнутого объема являются существенными факторами искажения результатов из-за наличия собственных погрешностей, изменения геометрии объема и сложности удаления воздуха.

4. *Момент потери прочности.* Разрыв жидкости всегда представляется исследователям как появление несплошности – пузырька (все «+» в таблице относятся к его наблюдению). С другой стороны, если растяжение жидкости сменяется растяжением выделившегося в ней газа, то изменяются и показания приборов (характеристика растяжения), причем пузырек может еще не появиться в поле зрения исследователя или прибора наблюдения или вообще не фиксироваться (для непрозрачных и отработанных жидкостей).

5. *Исследуемые жидкости.* Интерес в оценке прочности представляют не только чистые, но и отработанные жидкости, которые в эксплуатации окисляются и темнеют. Требуются исследования и прозрачных, и непрозрачных жидкостей.

6. *Методика вычислений.* Определяющим фактором возникновения кавитации в объемном гидроприводе является падение давления ввиду изменения каких-либо нагрузок и замкнутых объемов, а не охлаждение жидкости, соответственно, методика исследований должна давать критерий прочности на основе удельной нагрузки (напряжения, давления), чему соответствуют исследования В.А. Хохлова, В.Н. Пильгунова, Х.М. Баджетта и В.Е. Виноградова.

7. *Соответствие процессам в технике.* Возможность применения результатов непосредственно к повышению надежности объемных гидроприводов является основополагающим фактором проводимых исследований, ввиду чего они должны быть максимально приближены к условиям реальной эксплуатации техники и процессам, в ней протекающим. Наиболее близко работу гидропривода отражают исследовательские установки на основе увеличения герметичного объема [7, 9].

Выбор параметров исследования производился одновременно с созданием и совершенствованием исследовательской установки и методики, что, однако, не исключило всех проблем определения критерия прочности.

4. Особенности методики исследования

Для исследования прочности жидкости была создана установка на основе сильфона, изображенная на рис. 1. Замкнутый объем образуется шаровым краном 1 и сильфоном 2. Нагружение замкнутого объема производится через рычаг 3 путем заполнения водой емкости 5. Микрометр 4 измеряет относительное растяжение сильфона.

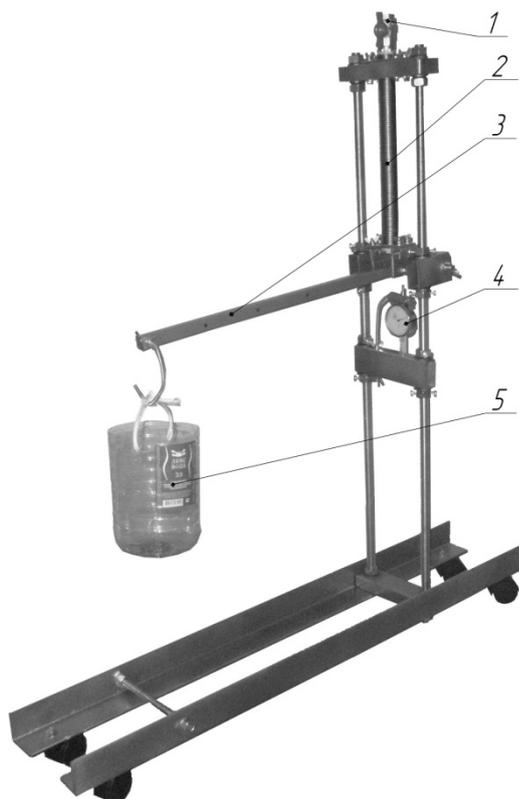
Данный тип исследовательской установки был выбран в связи с тем, что случаи увеличения замкнутого объема и, как следствие, падения давления в гидроприводах встречаются достаточно часто. Таким образом, растягивающийся сильфон подобен движущемуся поршню в гидроцилиндре или гидростатическому подпятнику, отрывающемуся от опорной поверхности. Следует отметить, что непосредственное использование гидроцилиндра влечет существенную погрешность ввиду внутренних утечек через кольцевые уплотнения поршня и штока. Сильфон в этом случае является абсолютно герметичным гидроцилиндром.

Ряд опасных особенностей, выявленных в процессе экспериментирования и способных существенно исказить критерий прочности, приведен в табл. 3. Также описаны разработанные положения методики, исключающие вредоносное воздействие.

В соответствии с разработанной методикой были проведены исследования:

- воды питьевой (СанПиН 2.1.4.559-96) из систем центрального водоснабжения;
- масла моторного Mannol SAE 5W-30 (всесезонное, для инжекторных двигателей ВАЗ-2114 (до 100 л.с., до 5000 об/мин), пробег 10000 км).

Характеристики нагружения представлены на рис. 2 и 3 соответственно.



Технические характеристики:

- Габаритные размеры (ДхШхВ), мм: 1000х25х1200
- Масса (приблизительно), кг: 10
- Объем емкости нагружения, л: 2
- Соотношение плеч рычага:
 - максимальное: 12,22
 - минимальное: 5,44
- Габаритные размеры сифонов, мм:
 - диаметр: до 40
 - длина: до 700
- Параметры микрометра:
 - точность, мм: 0,01
 - предел измерения, мм: 10
- Виды запорных элементов:
 - кран шаровый;
 - трубка прозрачная с краном шаровым;
 - трубка прозрачная с пробкой.
- Герметизация соединения:
 - компрессионное кольцо;
 - уплотнительная лента.

Рис. 1. Установка по исследованию прочности жидкостей:
1 – кран шаровый, 2 – сифон; 3 – рычаг, 4 – микрометр; 5 – емкость нагружения

Таблица 3

Особенности эксперимента и положения методики

Особенность	Положение методики
Воздух в гофраx сифона	1. Перед заполнением сифон нагружается до хода 2–3 мм для более полного раскрытия гофры. 2. Заполнение объема осуществляется со дна (предусмотрена трубка). 3. После заполнения производится простукивание сифона в течение 4–5 мин или до прекращения появления пузырьков в кране
Воздух под запорным элементом	Запорный элемент (шаровый кран) находится под уровнем исследуемой жидкости (всплывшие пузырьки воздуха располагаются над запорным элементом, сам запорный элемент не подсасывает воздух при закрытии)
Герметичность соединения кран/сифон	1. При использовании сифона с наворачиваемым запорным элементом (не вклеен в сифон) требуется установка герметизирующей шайбы и уплотнение резьбы лентой. 2. Возможно сравнение получаемой характеристики с характеристиками растяжения жидкости со специально впущенным воздухом. 3. При сохранении жидкостью прочности показания микрометра практически не изменяются
Работа микрометра	1. Однозначность установки микрометра во всех экспериментах обеспечивается совмещением отверстия опорной трубки микрометра с центрирующим винтом полки. 2. Проседание и разворот крепления микрометра во время нагружения и, как следствие, искажение показаний исключается контактом опорной трубки с полкой и цилиндрической поверхностью центрирующего винта
Вредное нагружение сифона	1. Влияние сил тяжести рычага, емкости нагружения, элементов крепления сифона и исследуемой жидкости в замкнутом объеме исключается переводом микрометра в положение «0». Сила сопротивления сифона при данном вредном нагружении учитывается при расчете критерия прочности
Нечувствительность сифона	Начало измерений с предварительно растянутым сифоном на 2...3 мм, ликвидация остаточной деформации сжатием и отдыхом

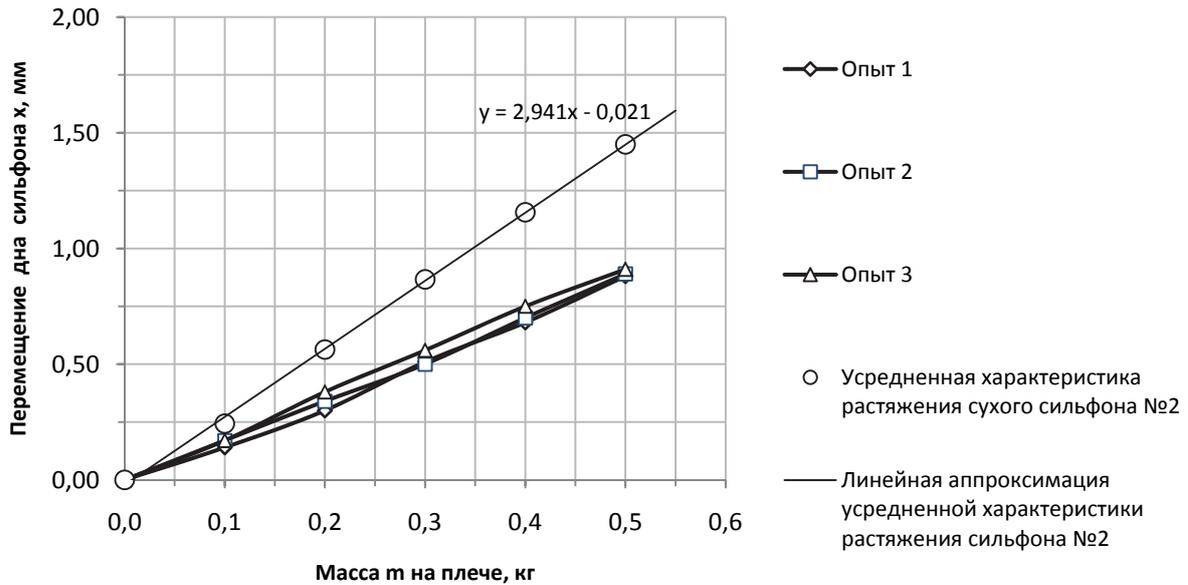


Рис. 2. Характеристики растяжения воды питьевой СанПиН 2.1.4.559-96, сиффон №2 ($D_y = 25$ мм), плечо рычага 245 мм

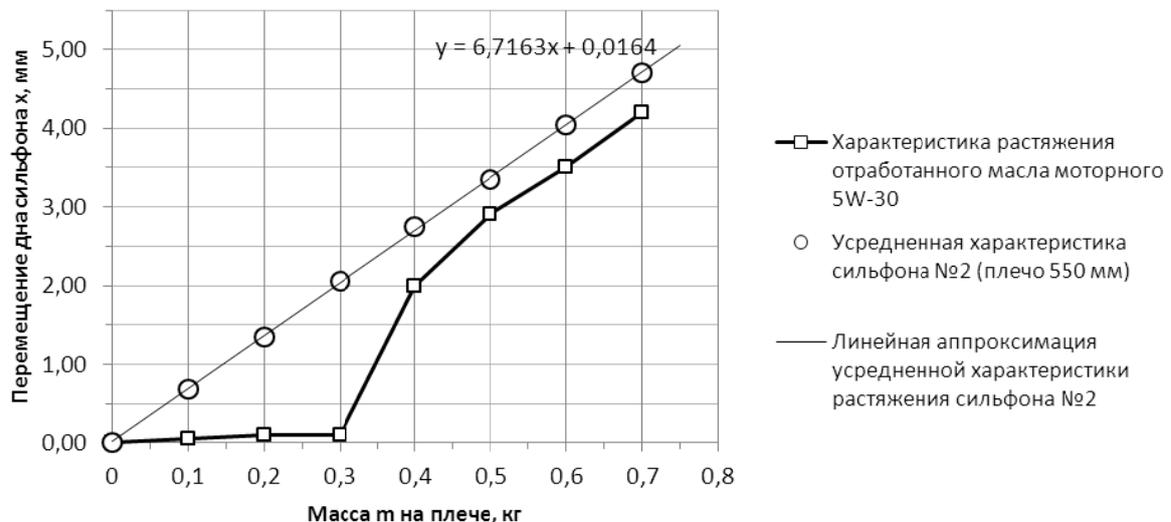


Рис. 3. Характеристики растяжения масла моторного отработанного SAE 5W-30 (10 000 км), сиффон №2 ($D_y = 25$ мм), плечо рычага 550 мм

Приведенные характеристики демонстрируют 2 показательных случая:

1. Отсутствие прочности питьевой воды (выделение воздуха происходит при малейшем нагружении).
2. Проявление прочности маслом моторным отработанным 5W-30 до достижения нагрузки на плечо рычага 0,3 кг (преломление характеристики растяжения).

Вычисленный для второго случая критерий прочности составил $p_p = -183,9$ кПа.

Значение критерия получается пересчетом массы воды в емкости нагружения через плечи рычага с учетом сопротивления сиффона в силу разрыва F_p , отнесенную к площади сиффона, вычисленной по условному диаметру D_y . Несмотря на то, что в замкнутом объеме существуют еще несколько характерных площадей, например, максимальный внутренний диаметр сиффона и минимальный внутренний диаметр сиффона, на данном этапе исследований было решено остановить выбор на определении критерия прочности через условный диаметр.

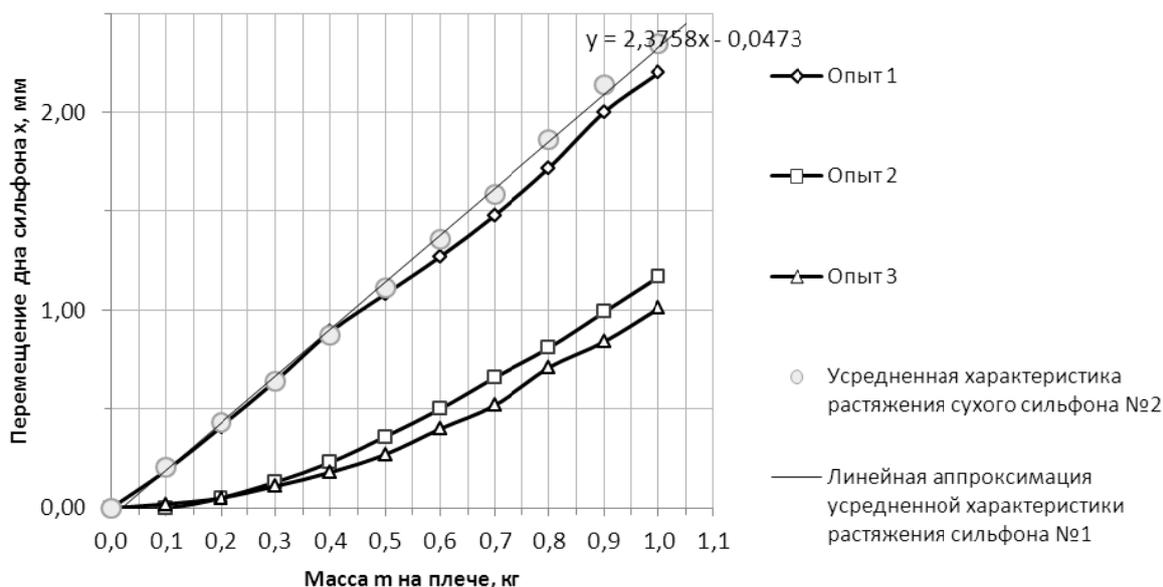


Рис. 4. К вопросу нечувствительности сильфонов

В процессе исследований была обнаружена еще одна особенность, отмеченная в табл. 3, — нечувствительность сильфона к малым нагрузкам. На рис. 4 приведена характеристика растяжения воды питьевой. Отчетливо видно проявление прочности у воды в опыте 2 и 3 при нагрузке на плече рычага до 0,1 кг, однако в опыте 1 ее практически нет. Кроме того, добиться преломления характеристики воды на других сильфонах также не удалось, ввиду чего было сделано предположение о наличии в сильфонах малой длины ($D_y = 20$ мм, $l = 140$ мм, $l/D_y = 7$) существенной нечувствительности.

Для исключения попадания в зону нечувствительности сильфонов было решено обеспечить предварительную нагрузку помимо вредных нагрузок, создаваемых рычагом, емкостью и элементами крепления. Одновременно этот шаг позволил улучшить условия заполнения сильфонов, обеспечив предварительное растяжение.

Итоги и направления дальнейших исследований

Разработанная установка и методика подготовки и проведения экспериментов должна обеспечивать получение объективного, обоснованного результата. В продолжение исследований прочности рабочих жидкостей и совершенствования установки и методики проводятся следующие работы:

1. Поиск совпадений критериев прочности для одной и той же жидкости на разных сильфонах с целью исключения зависимости результатов эксперимента от параметров сильфона.
2. Разработка методики анализа эксперимента с целью исключения ошибочных результатов, прежде всего из-за попадания воздуха в замкнутый объем, нарушения герметичности или влияния нечувствительности сильфона.
3. Установление зависимости между основными параметрами рабочих жидкостей (вязкости, давлением насыщенных паров, кислотного числа и т. д.) и критерием прочности.
4. Установление зависимости между показаниями вакуумметра и косвенной оценкой прочности через показания микрометра.
5. Совершенствование конструкции исследовательской установки с целью повышения надежности результатов.

Литература

1. Барышев, В.И. *Применяемость (выбор) масел в качестве рабочей жидкости гидропривода: учеб. пособие* / В.И. Барышев. — Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1993. — 71 с.
2. Розенберг, Ю.А. *Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин* / Ю.А. Розенберг. — М.: Машиностроение, 1970. — 315 с.

3. Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол; пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. – М.: Мир, 1975. – 98 с.
4. Рождественский, В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
5. Хейуорд, А. Отрицательные давления в жидкостях. Как их заставить служить человеку / А. Хейуорд // Успехи физических наук. – http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf.
6. Гегузин, Я.Е. Пузыри / Я.Е. Гегузин. – М.: Наука, 1985. – 180 с.
7. Хохлов, В.А. Электрогидравлический следящий привод / В.А. Хохлов. – М.: Наука, 1964. – 230 с.
8. Виноградов, В.Е. Исследование вскипания перегретых и растянутых жидкостей: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.Е. Виноградов. – Екатеринбург, 2006. – 43 с.
9. Пильгунов, В.Н. Исследование разрывной прочности минерального масла / В.Н. Пильгунов // Наука и образование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 17 с.

Барышев Валерий Иванович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). Тел.: (351) 267-92-52.

Лайко Константин Константинович. Аспирант кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ivnt_atya@mail.ru.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Mechanical Engineering Industry"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 105–112**

BASIS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE STRENGTH OF THE WORKING FLUIDS

V.I. Baryshev, South Urals State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

K.K. Laiko, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ivnt_atya@mail.ru

There were examined factors and consequences of reducing of strength of working fluid. The research contains a brief analytical survey of theoretical and experimental works that are devoted to description of cavitation effect and investigation of its first stage which is carried out in production of discontinuity flaw in the form of gas (steam and gas) bubble. The results of the own researches are elucidated and analyzed in this work. The emphasis is devoted to the methods of experiments' setting.

Keywords: cavities, strength of fluid, lack of adhesion of fluid, working fluid, bursting pressure, negative pressure, evolution of gas, oil, water.

Поступила в редакцию 12 апреля 2013 г.