

УДК 532.28:621.628

В.И. Барышев, К.К. Лайко, П.В. Анищенко

Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет), г. Челябинск

КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

Обсуждается термин «прочность жидкости», особенности критериев, численно его характеризующих, и правомерность использования термина «давление». Рассмотрен процесс сохранения и снижения прочности жидкости в современном силовом гидроприводе. Показана практическая значимость формулировки критерия прочности жидкости для комплексной оценки состояния рабочих жидкостей как альтернативы существующим критериям выбраковки (вязкости, концентрации механических примесей, кислотного числа, водосодержания и т.п.). Приведены примеры износа элементов узлов и агрегатов, для которых рабочая жидкость не была сменена ввиду сохранения критериев в установленных пределах.

Представлено сравнение исследований прочности жидкости по используемым критериям, способам подготовки образца жидкости к исследованию, предотвращения попадания воздуха в замкнутый объем и др. Приведены значения прочности, получаемые с помощью различных методов. Существенный разброс значений прочности от 0 до 1000 МПа при значительной обособленности методик, мировые тенденции повышения мощностей машин, требований к качеству и ресурсу материалов, необходимость энерго- и ресурсосбережения делают изучение данного вопроса сложным, интересным, актуальным и имеющим прикладное значение.

Представлена разработанная исследовательская установка для сильфонного метода исследования прочности жидкости. Описаны выявленные опасные особенности метода, способные привести к существенному искажению результатов. В дополнение к классическим критериям прочности, основанным на оценке давления (напряжения, $\text{Па} \equiv \text{Н/м}^2$), предложен критерий на основе оценки энергии растяжения (Дж). Обозначены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: жидкость, кавитация, прочность жидкости, несплошность, давление, разрыв, отрицательное напряжение, газосодержание, воздух в жидкости.

V.I. Baryshev, K.K. Laiko, P.V. Anischenko

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk

STRENGTH CRITERIA OF WORKING FLUIDS

«Liquid strength» term, criteria quantitatively determining liquid strength, appropriateness of «pressure» term under conditions of interest are discussed. Liquid strength conservation and reduction processes in modern power hydraulic drives are considered. Practical importance of formulation of water strength criterion is stated. Such a criterion is needed in order to give comprehensive estimate of working fluid state as an alternative to existing defects criteria (viscosity, concentration of chemical admixtures, acid number, liquid abundance etc). Examples of wear of units elements for which working fluid isn't changed because of criteria conservation in normative limits are presented.

Comparison of experimental methods for liquid strength determination is carried out in terms of strength criteria, methods of liquid samples preparation for measurements, methods of prevention of air invasion into the bounded volume etc. Liquid strengths obtained with help of different methods are presented. The wide range of liquid strengths obtained in conditions of considerable difference of techniques, world tendency of increase of drives power, increase of service life and quality requirements, the need of energy-saving and resource-saving make great relevance and practical importance of considered topic.

Experimental device based on bellow method of liquid strength investigation is constructed and presented. Discovered dangerous features of the method used that are capable to strongly change measurements results are described. Liquid strength criterion based on tension energy (J) estimate is proposed in addition to existing canonical criteria based on pressure estimation (Pa). Prospects for future works are stated.

Keywords: liquid, cavitation, strength of liquid, discontinuity, pressure, gap, negative pressure, gas concentration, air in the liquid.

Прочность жидкости

Прочность материала в любом агрегатном состоянии определяется связями между его молекулами. Рабочие жидкости гидропривода представляют собой многокомпонентную смесь, состоящую из базового масла (основы), эмульсии (воды и масляных фракций в масле) и суспензии (механических частиц в масле) [1, 2]. Прочность жидкостей неоднородного состава определяется связями между молекулами разных материалов. Воздействие на связи может происходить в тангенциальном (касательном) и (или) нормальном направлении. В первом случае возникают сдвиговые напряжения. Сдвиговая прочность проявляется в способности жидкости сохранять первоначальное состояние (смещение слоев исчезающе мало) и характеризуется вязкостью. Во втором случае возникают нормальные напряжения (давление). Если такие напряжения стремятся увеличить объем жидкости, т.е. разорвать ее, то при сохранении объема до определенного уровня напряжений следует говорить о проявлении объемной прочности. До настоящего времени однозначный критерий, характеризующий объемную прочность жидкости, не определен. На рис. 1 приведено примерное распределение применяемых критериев, полученное при обзоре научно-технической литературы и периодических изданий, посвященных проблемам прочности жидкости и кавитации.

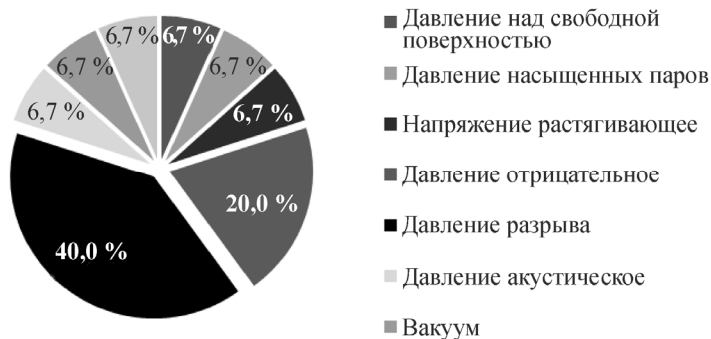


Рис. 1. Распределение критериев прочности жидкости

Около 70 % (см. рис. 1) приходится на долю критериев «давление разрыва» (40 %), «давление отрицательное» (20 %) и «напряжение растягивающее» (6,7 %). Эта группа качественно отличается от остальных критериев прочности по существенному признаку: их значения могут находиться вне диапазона барометрической шкалы (ниже абсолютного нуля давления), переходя на шкалу напряжений, но зачастую сохраняя термин «давление» и его размерность. На эту особенность авторы исследований не обращают внимания, приводя значения прочности, как давления ниже атмосферного, в несколько десятков и сотен атмосфер, что другие специалисты могут счесть ошибочным. Вопрос правомерности использования термина «давление» может быть разрешен, если принять, что давление – нормальное напряжение (удельная энергия) не только сжатия, но и растяжения жидкости. В дальнейшем, с учетом этого соображения, сохраняя традицию наименований и ориентируясь на статистику, при описании собственных исследований будем использовать термин «давление разрыва».

Причины снижения прочности и ее последствия

Состояние рабочих жидкостей объемных гидроприводов различного назначения сегодня оценивается основными параметрами: вязкостью, давлением насыщенных паров, кислотным числом, концентрацией воды и механических примесей. Методы и средства оценки достаточно отработаны, дают высокую достоверность результатов. Однако до 70 % отказов [1, 3] 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. На рис. 2 схематично приведены основные причины снижения прочности жидкости [4–7].



Рис. 2. Основные причины снижения прочности жидкости

Первая причина – увеличение замкнутого объема во всасывающих каналах – достаточно существенно проявляется в аксиально-поршневых и пластинчатых насосах, не имеющих давления поджима во всасывающей линии.

Вторая причина – пульсирующие и знакопеременные нагрузки на исполнительных органах – актуальна для рулей и шасси летательных аппаратов, управляемых гидроцилиндрами, при изменении курса или посадке, а также для стрел подъемных установок, дорожно-строительной и другой техники, в процессе работы которой возникают моменты запираения жидкости в герметичном (или стремящемся к такому) объеме и приложения нагрузок, стремящихся увеличить объем.

Третья причина – отрыв потока – широко распространена в запорно-распределительной гидроаппаратуре и может усугубляться инерционностью потока из-за высокой частоты переключений и высоких скоростей течения в каналах.

Четвертая причина – загрязнение, окисление и обводнение – неизбежно возникает при любых режимах работы гидравлической техники. Ее влияние может быть снижено путем своевременного квалифицированного технического обслуживания и диагностирования состояния жидкости.

Среди последствий снижения прочности к основным следует отнести [1–3]:

1. Пригар, навалакивание, спайка, температурные трещины поверхностей рабочих органов гидромашин и агрегатов из-за снижения несущей и смазывающей способностей рабочей жидкости (в том числе сухой контакт металлических поверхностей), например в парах трения аксиально-поршневых гидромашин «подпятник поршня – опорный диск», пластинчатых и шестеренных гидромашин «торцевой распределитель – замыкатель (шестерня)».

2. Развитая кавитация с последующим выкрашиванием, например в окнах торцевых распределителей поршневых и пластинчатых насосов, запорных элементах распределительной аппаратуры.

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

Приборы учета и контроля состояния гидросистем не могут фиксировать зарождение несплошности жидкости (начальной стадии кавитации), а только свидетельствуют о ее последствиях по выходу значе-

ний температур, расходов и давлений за допустимые диапазоны, что объясняется влиянием на прочность каждого параметра. В связи с этим необходима формулировка комплексного критерия прочности для оценки воздействия изменения основных параметров жидкости с целью повышения надежности техники посредством тщательного выбора рабочих жидкостей и разработки эксплуатационных рекомендаций.

Обзор экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования прочности жидкости проводили Ф. Донни (1843 г.), М. Бертло (1850 г.), О. Рейнольдс (1878 г.), А.М. Уордингтон (1893 г.), Дж. Майер (1911 г.), Х.М. Баджетт (1912 г.), Р.С. Винсент (1943 г.), Х.-Н.В. Темперли (1946 г.), А.Ф. Скотт (1948 г.), Л. Бриггс (1949 г.), В.А. Хохлов (1964 г.), В.Е. Виноградов (2006 г.). Фундаментальные теоретические работы по зарождению и развитию несплошности жидкости и кавитации принадлежат И.Н. Харви, И. Пирсолу, Я.Б. Зельдовичу, Г. Биркгофу, Э. Сарантонелло, М.С. Плессету, В.В. Рождественскому. Последние 10–15 лет активно развивается математическое и компьютерное моделирование на основе этих теорий. К числу авторов, работающих в этом направлении, относятся Е.Ю. Кумзерова, В.И. Бажанов, В.А. Непомнящий, А.Я. Исаков, А.А. Исаков.

Для численной оценки прочности жидкости использовались различные методы и критерии [3–7, 9, 11–15]. Критерии в подавляющем большинстве имели размерность давления (Па) или напряжения – удельной объемной энергии (Дж/м³). На рис. 3 приведены численные значения критериев прочности, полученные для обычной воды при комнатной температуре различными методами. Разброс значений ярко выражен не только в зависимости от метода исследования, но и в рамках одного и того же метода (например, термический или центробежный). Расчетный (теоретический) метод служит показательным примером получения фактически любого значения прочности в зависимости от принятых допущений. Эти замечания свидетельствуют о многофакторности эксперимента и предоставляют обширную область для дальнейших исследований.

В табл. 1 дано краткое описание методов исследования. На рис. 4 приведены диаграммы результатов обзора состояния вопроса по выработанным группам параметров, позволившим выработать следующие ориентиры для создания собственного метода и исследовательской установки:

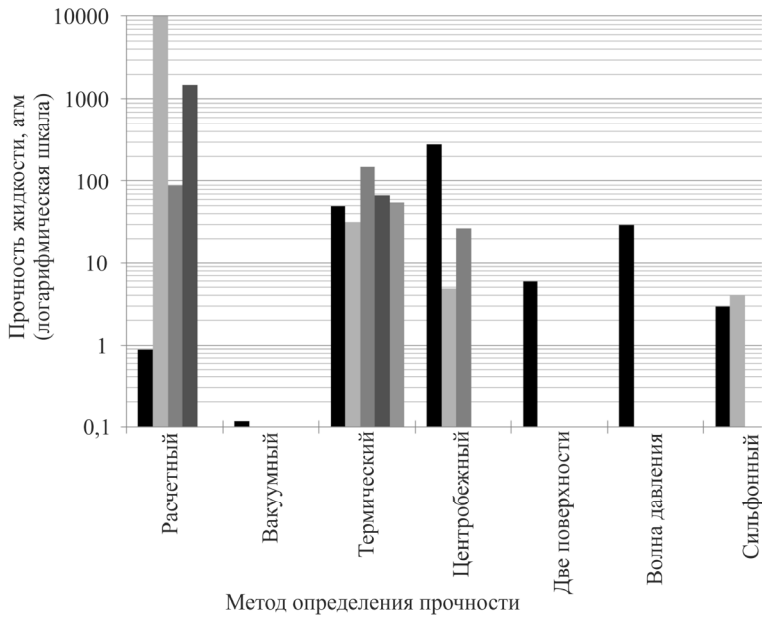


Рис. 3. Значения прочности воды, полученные различными методами

Таблица 1

Методы исследования прочности жидкости

№ п/п	Метод	Краткое описание
1	Расчетный	Основан на теории начальной стадии кавитации – зарождении и развитии пузырька газа в объеме жидкости [3, 5–7, 12, 13]
2	Вакуумный	Вакуумирование жидкости со свободной поверхностью в емкости до появления пузырька в прозрачной глухой трубке-отводе [11]
3	Термический	Охлаждение жидкости в герметично запаиваемой капиллярной стеклянной трубке до появления в ней пузырька [6, 11]
4	Центробежный	Вращение запаиваемого или специально профилированного открытого капилляра с жидкостью до появления в нем пузырька [6, 11]
5	Две поверхности	Отрыв двух смоченных зеркальных поверхностей друг от друга до падения усилия и наблюдения разрыва слоя жидкости [11]
6	Волна давления	Появление пузырьков при отражении волны отрицательного давления от жесткой преграды [2]
7	Сифонный	Увеличение замкнутого объема с помощью сифона до всплытия пузырька (пузырьков) в прозрачной трубке [11, 15]

1. В большинстве работ (75 %) значение критерия прочности вычисляется на момент появления пузырька воздуха в поле зрения человека или некоторого регистратора, что не всегда соответствует истине

(прочность может теряться раньше, чем всплывает пузырек). Кроме того, наблюдение пузырька в отработанных (непрозрачных) жидкостях затруднительно. Судить о возникновении несплошностей можно по характеристике нагружения замкнутого объема, построенного по показаниям приборов: увеличение объема при превышении определенной нагрузки (излом характеристики) дает значение критерия прочности.

2. Из всех рассматриваемых авторами факторов наиболее часто упоминаются характеристики поверхности емкости для исследуемой жидкости (27,6 %): чистота, удобообтекаемая геометрия, шероховатость. Они очень важны, так как исследование прочности жидкости легко переходит в исследование прочности сцепления жидкости и твердой стенки, если последняя имеет сложную геометрию и концентрирует на себе пузырьки воздуха. Также значительное внимание авторы уделяют конструктивным особенностям исследовательской установки и тщательной проработке методики эксперимента (по 17,2 %), несколько меньшее (13,8 %) – приборному оснащению. Это вполне объяснимо, поскольку точность используемых приборов достаточно высока, а ошибки конструирования и/или несовершенство методики приводят к значительным погрешностям и не дают постоянства результатов.

3. Обеспечение абсолютного отсутствия воздуха является сложной задачей, поэтому значительный процент исследователей (38,9 %) опирается на методы, предусматривающие или требующие его наличие. Гидропривод исключает наличие воздуха в рабочих органах и устройствах, поэтому подобие таких методов исследования реальным процессам достаточно условно, что обуславливает необходимость различных операций по удалению воздуха и обеспечению наилучшего заполнения.

4. Прозрачные рабочие жидкости, в том числе вода, использовались всеми авторами для четкого наблюдения пузырьков воздуха (83,3 %). Очень малая часть исследователей испытывала образцы агрессивных и непрозрачных (отработанных) рабочих жидкостей, что во многом обусловлено необходимостью наблюдать всплытие пузырька (пузырьков) воздуха. На сегодняшний день актуальной задачей является не только оценка наивысшего значения прочности, но и оценка остаточного ресурса отработанных жидкостей, которые далеко не всегда прозрачны.

5. Преобладающей тенденцией исследований является установка измерительных приборов вне замкнутого объема, т.е. косвенное измерение прочности. Это связано с проблемой нарушения геометрии объ-

ема, т.е. созданием концентраторов несплошностей, способных существенно исказить результаты эксперимента. Установка образцового вакуумметра влечет за собой проблему вытравливания воздуха из подводящего канала в безвоздушных методах. Кроме того, чувствительные элементы приборов вносят определенную погрешность ввиду своих перемещений от какого-либо воздействия на исследуемый образец.

6. Идеальным случаем может служить исключение каких-либо расчетов (20 %), однако почти половина методов все же требует пересчета измеренных параметров (температуры, нагрузки и т.п.) в давление разрыва или напряжение (46,7 %).



Рис. 4. Обзор основных методов исследования прочности жидкости

Метод и исследовательская установка

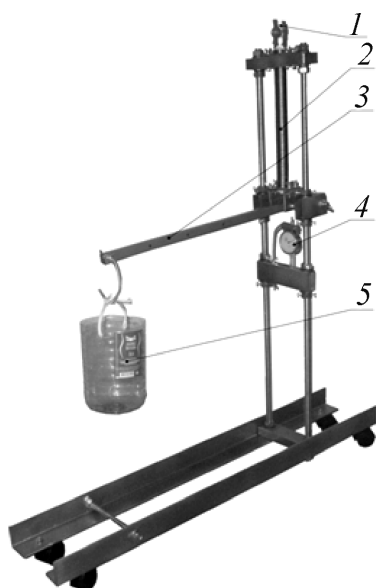


Рис. 5. Исследовательская установка на основе сифона

Для исследования прочности жидкости была создана установка на основе сифона, изображенная на рис. 5. Сущность метода заключается в следующем. Замкнутый объем, образуемый шаровым краном 1 и сифоном 2, заполняется исследуемой жидкостью. Нагружение замкнутого объема производится через рычаг 3 путем заполнения емкости 5 водой. Микрометр 4 измеряет относительное растяжение сифона. При сохранении жидкостью прочности показания микрометра 4 не изменяются.

Технические характеристики исследовательской установки (см. рис. 4):

Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	1000×25×200
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	

В ходе испытания строится характеристика нагружения замкнутого объема по показаниям микрометра 4. Возможные варианты качественно представлены на рис. 6. При проявлении прочности в характеристике наблюдается излом. Точка излома является моментом времени потери прочности. Критерий прочности рассчитывается по значению силы (абсциссы) в этой точке. При попадании в герметичный объем воздуха точка излома на характеристике пропадает, однако сама характеристика значительно отличается от тарировочной, имея меньший угол наклона, что обусловлено сопротивлением растяжению воздуха. В случае если герметичность объема не обеспечена, характеристика нагружения приближается к тарировочной характеристике сильфона.

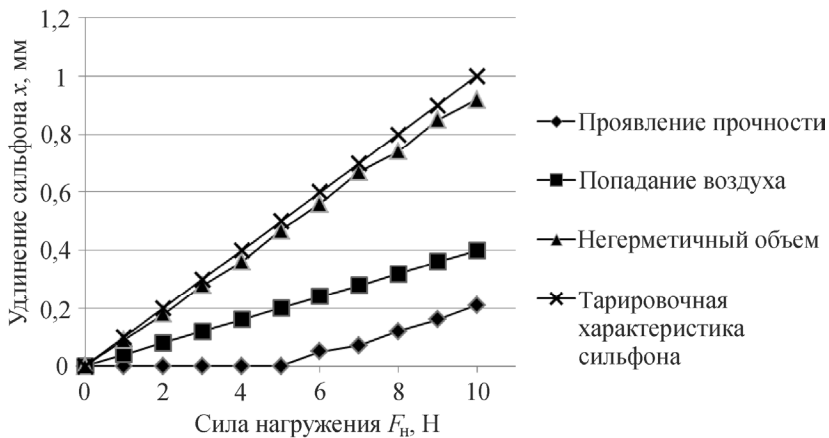


Рис. 6. Виды характеристик нагружения

По аналогии с работой [15] критерием прочности первоначально послужило давление разрыва p_p ($\text{Н/м}^2 \equiv \text{Па}$), определяемое как отношение силы разрыва F_p к максимальной площади замкнутого объема $S_{\max}$:

$$p_p = \frac{F_p}{S_{\max}}. \quad (1)$$

Сила разрыва F_p рассчитывается при известных массе m в емкости 5, плече сильфона L_c и плече нагружения L и учитывает силу сопротивления сильфона F_c растяжению при его удлинении, определяемого при тарировании открытого незаполненного сильфона:

$$F_p = mg \frac{L}{L_c} - F_c, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $mg \frac{L}{L_c} = F_n$ – сила нагружения сиффона в точке его крепления, Н.

При нулевом удлинении (сохранении прочности) сила сопротивления сиффона F_c равна нулю, т.е.

$$F_p = F_n. \quad (3)$$

Сиффонный метод исследования физически наиболее точно соответствует основным причинам потери прочности в объемном гидроприводе: растягивающийся сиффон подобен перемещаемому в гидроцилиндре поршню или отрываемому от опорной поверхности гидростатическому подпятнику. В табл. 2 приведено обоснование причин отказа от других методов.

Таблица 2

К вопросу выбора сиффонного метода исследований

№ п/п	Метод	Причина отказа (особенность метода)
1	Термический, вязкостный	1. Принудительное растворение воздуха в замкнутом объеме (нет возможности полностью удалить его при закрытии капилляра) 2. Применим только к прозрачным жидкостям (требуется наблюдение пузырька) 3. Слабо соответствует процессам в гидроприводе (причиной потери прочности обычно служит перепад давления, а не температур)
2	Центробежный	1. Емкость с исследуемой жидкостью всегда соединена с воздушной средой 2. Применим только к прозрачным жидкостям (требуется наблюдение пузырька)
3	Вакуумный	1. Не соответствует процессам в объемном гидроприводе из-за наличия воздушной вакуумируемой камеры и стеклянного капилляра 2. Применим только к прозрачным жидкостям (требуется наблюдение пузырька)
4	Поршневой	1. Гидроцилиндр не является абсолютно герметичным агрегатом, что может повлечь существенную погрешность
5	Волна давления	1. Применим только к прозрачным жидкостям (требуется наблюдение пузырька)
6	Две поверхности	1. Отсутствие объема жидкости (ближе к исследованию пограничного слоя) 2. Применим только к прозрачным жидкостям (требуется наблюдение пузырька)

Использование гидроцилиндра в качестве элемента, способного увеличивать замкнутый объем, не представляется возможным, так как влечет существенную погрешность ввиду внутренних утечек через кольцевые уплотнения поршня и штока. Сильфон в этом отношении является абсолютно герметичным гидроцилиндром.

Результаты исследований

Проведенные экспериментальные исследования на основе построенных характеристик позволили выявить ряд опасных особенностей сильфонного метода и скорректировать методику испытаний, получить численные значения объемной прочности жидкости по критерию «давление разрыва». На основе проведенных исследований предложены новые критерии прочности:

1. Опасные особенности метода сведены в табл. 3. Главной опасностью является сохранение воздуха в гофрах сильфона даже при тщательнейшем заполнении. Очень малое его количество не позволяет определить прочность, так как увеличение объема сильфона происходит в самом начале нагружения (см. «попадание воздуха» на рис. 6). Для устранения этой опасности был разработан метод последовательного упрочнения, состоящий из двух многократно повторяющихся этапов: обычного нагружения с измерением удлинения сильфона и максимального нагружения, ограниченного возможностями установки, без контроля удлинения сильфона. Второй этап необходим для принудительного вытравливания воздуха из сильфона. Между этими этапами замкнутый объем открывается для свободного выхода воздуха. Метод не лишен собственной опасности – упрочнения жидкости, которое является нежелательным при оценке остаточного ресурса. На данном этапе проблема решается вычислением прочности по первой достигнутой характеристике с изломом.

2. Численные значения давления разрыва были получены в сериях экспериментов для образцов масла HLP, дизельного топлива летнего и масла гидравлического авиационного АМГ-10. На рис. 7 приведена сводная характеристика исследования прочности масла АМГ-10 по методу последовательных нагружений (упрочнений). Полиномиальная аппроксимация имеет вторую степень.

Для 1-го и 10-го нагружения построены диапазоны погрешностей по обеим осям: по оси силы нагружения выбрана 5%-ная погрешность, по оси перемещения – $1/2$ цены деления шкалы микрометра. Критическое нагружение с последующим открытием замкнутого объема

производилось после каждого измерения. Угол наклона аппроксимирующей характеристики при этом уменьшался, это свидетельствует о выходе некоторого количества воздуха из замкнутого объема, что подтверждается наблюдением пузырьков воздуха на свободной поверхности после открытия крана.

Вид характеристик свидетельствует об обеспечении герметичности замкнутого объема, однако до 9-го опыта все они относятся к случаю наличия в гофре сильфона воздуха. На 9-м и 10-м измерениях жидкость проявляет прочность в диапазоне сил нагружения до 7–10 Н. Давление разрыва, вычисленное на условном диаметре сильфона d_y , для АМГ-10 составило

$$p_p = \frac{F_n}{S_{Dy}} = \frac{4F_n}{\pi d_y^2} = \frac{4 \cdot 7}{3,14 \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2} = 14,7 \text{ кПа.}$$

Таблица 3

Исключение опасных особенностей сильфонного метода

№ п/п	Особенность	Положение методики
1	Воздух в гофрах сильфона	1. Перед заполнением сильфон нагружается до хода 2–3 мм для более полного раскрытия гофры
		2. Заполнение объема осуществляется со дна (предусмотрена трубка)
		3. После заполнения производится простукивание сильфона в течение 4–5 мин или до прекращения появления пузырьков в кране
		4. Применяется разработанный метод последовательного упрочнения
2	Воздух под запорным элементом	1. Запорный элемент (шаровый кран) находится под уровнем исследуемой жидкости (всплывшие пузырьки воздуха располагаются над запорным элементом, сам запорный элемент не подсасывает воздух при закрытии)
		2. Перед началом испытаний производится многократное закрытие/открытие запорного элемента для обеспечения смачивания его поверхностей и выхода воздуха из зазоров
3	Герметичность соединения кран – сильфон	1. При использовании сильфона с наворачиваемым запорным элементом (не вклеен в сильфон) требуется установка герметизирующей шайбы и уплотнение резьбы лентой
		2. Возможно сравнение получаемой характеристики с характеристиками растяжения жидкости со специально впускным воздухом
		3. При сохранении жидкостью прочности показания микрометра практически не изменяются

Окончание табл. 3

№ п/п	Особенность	Положение методики
4	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
5	Вредное нагружение сильфона	Влияние сил тяжести рычага, емкости нагружения, элементов крепления сильфона и исследуемой жидкости в замкнутом объеме исключается переводом микрометра в положение «0»
6	Нечувствительность сильфона	Начало заполнения и измерения с предварительно растянутым на 2–3 мм сильфоном, ликвидация остаточной деформации сжатием и отдыхом
7	Упрочнение жидкости	Расчет критерия прочности производится по первой характеристике нагружения, содержащей излом

В аналогичных исследованиях В.А. Хохлова [15] давление разрыва для АМГ-10 после опрессовывания давлением 25 атм с целью повышения прочности составило порядка 60 кПа. Автор отмечает, что без подготовки проб давление разрыва близко к нулю, что полностью соответствует первым характеристикам растяжения (см. рис. 7).

3. Давление p , действующее на замкнутый объем при силе нагружения F_n , является удельной потенциальной энергией. Переход к действительной потенциальной энергии E_n осуществим при известном объеме исследуемой жидкости W и условии (3), т.е.

$$E_n = pW = \frac{F_n}{S_{Dy}} W. \quad (4)$$

При подстановке в (4) известного объема и найденного давления разрыва энергия разрыва при замкнутом объеме в 180 мл

$$E_n = 14,7 \cdot 10^3 \cdot 180 \cdot 10^{-6} = 2,62 \text{ Дж.}$$

4. На некоторых исследуемых жидкостях, например водопроводной воде и отработанном моторном масле SAE 5W-30 (10 000 км пробега), достичь излома характеристики нагружения даже после 10 последовательных упрочнений не удалось, что может быть объяснено 2 причинами:

1) прочность жидкостей настолько мала, что требует определения при крайне малых нагружениях (0,05–1,0 Н);

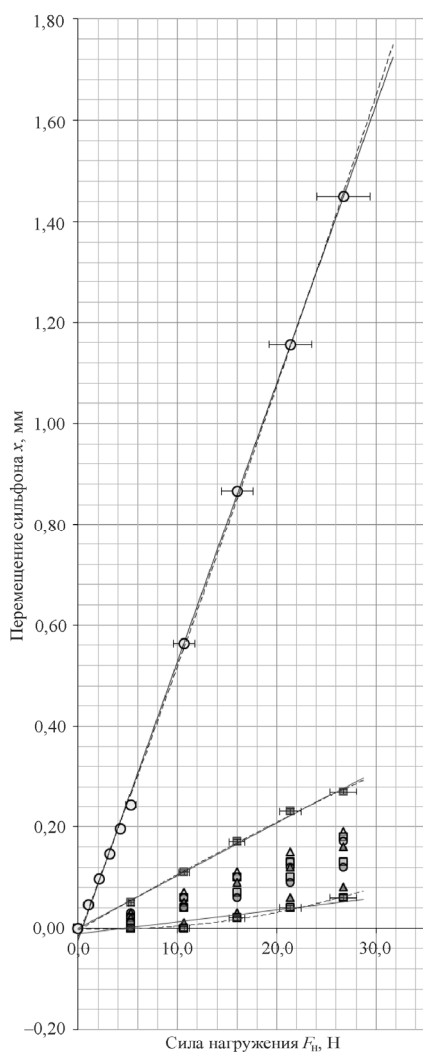


Рис. 7. Характеристики последовательных нагружений АМГ-10: ■ – 1; ● – 2; ▲ – 3; □ – 4; ○ – 5; ▲ – 6; □ – 7; ● – 8; ▲ – 9; ■ – 10; ○ – растяжение сильфона; ----- полиномиальная аппроксимация 1; ——— линейная аппроксимация 1; ----- полиномиальная аппроксимация 10; ——— линейная аппроксимация 10; ——— линейная аппроксимация растяжения сильфона; ----- полиномиальная аппроксимация растяжения сильфона

2) жидкости содержат большое количество воздуха и могут показывать прочность только при полном его растворении или откачке.

Для оценки эффективности последовательных упрочнений был выработан критерий «приращение прочности», основанный на оценке изменения тангенса угла наклона текущей характеристики по сравнению с предыдущей при линейной аппроксимации экспериментальных данных:

$$k_p = \frac{\operatorname{tg} \alpha_i - \operatorname{tg} \alpha_{i+1}}{\operatorname{tg} \alpha_i}, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \alpha_i$ – тангенс угла наклона предыдущей характеристики; $\operatorname{tg} \alpha_{i+1}$ – тангенс угла наклона текущей характеристики.

На данном этапе исследований, если приращение прочности составляет до 0,01, упрочнение считается неэффективным, а жидкость непрочной.

Итоги и направления дальнейших исследований

1. Выявлены опасные особенности сильфонного метода исследования прочности жидкости, усовершенствована методика проведения экспериментов, доработана исследовательская установка.

2. Внедрена методика последовательных упрочнений. Сфор-

мулирован критерий «приращение прочности», характеризующий эффективность упрочнений. В первом приближении на основе опытных данных обозначено критическое значение 0,01.

3. Получены характеристики нагружения различных рабочих жидкостей, с помощью критерия «давление разрыва» вычислены значения прочности. Для авиационного гидравлического масла АМГ-10 прочность составила 14,7 кПа, что при возможном разбросе значений на несколько порядков (см. рис. 3) достаточно хорошо соотносится с результатом 60 кПа, полученным ранее В.А. Хохловым [15] для упрочненной жидкости.

4. Сформулирован критерий «энергия разрыва». В дальнейших исследованиях с его помощью предполагается установить влияние объема исследуемой жидкости на значение прочности. Предполагается, что для одного и того же образца жидкости при применении сифонов разных диаметров и объемов должны оставаться относительно постоянными либо давление разрыва, либо энергия разрыва.

5. Запланировано сопоставление сформулированных критериев прочности с критериями выбраковки (вязкостью, кислотным числом, влагосодержанием, механическими примесями и т.д.), установленными сертифицированными лабораториями. Работа в этом направлении может быть продолжена после выполнения п. 4.

Библиографический список

1. Барышев В.И. Применяемость (выбор) масел в качестве рабочей жидкости гидропривода: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. техн. ун-та, 1993. – 71 с.
2. Виноградов В.Е. Исследование вскипания перегретых и растянутых жидкостей [Электронный ресурс]. – URL: <http://elar.usu.ru/bitstream/1234.56789/942/urgu0423s.pdf>.
3. Лайтхилл Дж. Волны в жидкости. – М.: Наука, 1980. – 600 с.
4. Непомнящий В.А. Возникновение и развитие кавитации в гидравлических системах. Объемная прочность жидкости и ядро кавитации [Электронный ресурс]. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=13043348.pdf>.
5. Гегузин Я.Е. Пузыри. – М.: Наука, 1985. – 180 с.
6. Пирсол И. Кавитация. – М.: Мир, 1975. – 98 с.
7. Рождественский В.В. Кавитация. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
8. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 315 с.

9. Исаков А.Я., Исаков А.А. О кавитационной прочности технических жидкостей / Вестник Камчат. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 7. – С. 17–30.

10. Советские достижения в мировой науке. Разрушение жидкостей [Электронный ресурс]. – URL: <http://mehanicka.ru/394.html>.

11. Хейуорд А. Отрицательные давления в жидкостях. Как их заставить служить человеку [Электронный ресурс] // Успехи физических наук. – URL: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf.

12. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. – М.: Мир, 1964. – 468 с.

13. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. – М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1957. – 110 с.

14. Кумзерова Е.Ю. Численное исследование образования и эволюции пузырей пара в условиях падения давления жидкости: автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2004. – 15 с.

15. Хохлов В.А. Электрогидравлический следящий привод. – М.: Наука, 1964. – 230 с.

References

1. Baryshev V.I. *Primenyaemost (vybor) masel v kachestve rabochey zhidkosti gid-roprivoda* [Applicability of oils as working fluid of a hydraulic actuator]. *Chelyabinskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet*, 1993. 71 p.

2. Vinogradov V.E. *Issledovanie vskipaniya peregretykh i rastyanutykh zhidkostey* [Research of boiling up of the overheated and stretched liquids], available at: <http://elar.usu.ru/bitstream/1234.56789/942/urgu0423s.pdf>.

3. Laytkhill Dzh. *Volny v zhidkosti* [Waves in liquid]. Moscow: Nauka, 1980. 600 p.

4. Nepomnyashchiy V.A. *Vozniknovenie i razvitie kavitatsii v gidravlicheskikh sistemakh. Obemnaya prochnost zhidkosti i yadro kavitatsii* [Origin and cavitation development in hydraulic systems. Volume strength of liquid and cavitation core], available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=13043348.pdf>.

5. Geguzin Ya.E. *Puzyri* [Bubbles]. Moscow: Nauka, 1985. 180 p.

6. Pirsol I. *Kavitatsiya* [The cavitation]. Moscow: Mir, 1975. 98 p.

7. Rozhdestvenskiy V.V. *Kavitatsiya* [The cavitation]. Leningrad: Sudostroenie, 1977. 248 p.

8. Rozenberg Yu.A. *Vliyanie smazochnykh masel na nadezhnost i dolgovechnost mashin* [Influence of lubricating oils on reliability and durability of machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 315 p.

9. Isakov A.Ya., Isakov A.A. *O kavitatsionnoy prochnosti tekhnicheskikh zhidkostey* [About the cavitation strength of technical liquids]. *Vestnik Kamchat-skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 7, pp. 17-30.

10. *Sovetskie dostizheniya v mirovoy nauke. Razrushenie zhidkostey* [The Soviet achievements in world science. Destruction of liquids], available at: <http://mekhanicka.ru/394.html>.

11. Kheyuord A. *Otritsatelnye davleniya v zhidkostyakh. Kak ikh zastavit sluzhit cheloveku* [Negative pressure in liquids. How to force them to serve the man]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, available at: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf.

12. Birkgof G., Sarantonello E. *Strui, sledy i kaverny* [Streams, traces and cavities]. Moscow: Mir, 1964. 468 p.

13. Kornfeld M. *Uprugost i prochnost zhidkostey* [Elasticity and strength of liquids]. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat, 1957. 110 p.

14. Kumzerova E.Yu. *Chislennoe issledovanie obrazovaniya i evolyutsii puzyrey para v usloviyakh padeniya davleniya zhidkosti* [Numerical research of formation and evolution of bubbles of steam in the conditions of decrease of liquid pressure: abstract of dissertation of the candidate of physico-mathematical sciences]. St. Petersburg, 2004. 15 p.

15. Khokhlov V.A. *Elektrogidravlicheskiy sledyashchiy privod* [The electric tracking drive]. Moscow: Nauka, 1964. 230 p.

Об авторах

Барышев Валерий Иванович (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76).

Лайко Константин Константинович (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: ivnt_atya@mail.ru).

Анищенко Павел Владимирович (Челябинск, Россия) – магистрант кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: pav_benn@mail.ru).

About the authors

Baryshev Valery Ivanovich (Chelyabinsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydraulics and Hydropneumatics, South Ural State University (National Research University) (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation).

Laiko Konstantin Konstantinovich (Chelyabinsk, Russian Federation) – Doctoral student, Department of Hydraulics and Hydropnevmosystems, South Ural State University (National Research University) (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: ivnt_atya@mail.ru).

Anischenko Pavel Vladimirovich (Chelyabinsk, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Hydraulics and Hydropnevmosystems, South Ural State University (National Research University) (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: pav_benn@mail.ru).

Получено 25.07.2013