

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.10

УДК 532.1

**К.В. Найгерт, С.Н. Редников, Н.М. Япарова**

Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

## **ПРОЦЕССЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В ЗАЗОРАХ ЗОЛОТНИКОВЫХ ПАР**

Описываются процессы полимеризации и поликонденсации, протекающие в зазорах прецизионных золотниковых пар. Авторами рассматриваются теоретические основы механизмов течения как обратимых процессов полимеризации и поликонденсации, так и условий их необратимости и перехода данных процессов, носящих временный характер, к процессам полного стеклования рабочей среды во внешних силовых механических полях. Приведены результаты натурального эксперимента, иллюстрирующие нелинейность физико-химических процессов, протекающих в рабочей среде гидравлических приводов высокого давления, и указывающие на их локальный характер. Также приведена принципиальная схема экспериментальной установки и измерительного модуля оригинальной конструкции, позволяющая производить исследование физико-химических процессов, протекающих в рабочей среде, находящейся в зазорах прецизионных пар трения.

**Ключевые слова:** гидравлические системы высокого давления, прецизионные пары трения, золотник, мультипликатор высокого давления, вязкость, гидравлическая рабочая среда, гидравлический измерительный модуль, полимеризация, поликонденсация, механическое стеклование, деструкция полимеров.

**K.V. Naigert, S.N. Rednikov, N.M. Yaparova**

South Ural State University (National Research University),  
Chelyabinsk, Russian Federation

## **THE PROCESSES OF POLYMERIZATION OF WORKING FLUID IN THE GAPS OF HYDRAULIC SPOOL COUPLES**

The article describes the processes of polymerization and polycondensation in the gaps of precision friction couples. The authors examine the theoretical foundations of existing arrangements for the reversible processes of polymerization and polycondensation and also irreversibility of these processes, which is resulting to the processes of mechanical vitrification of hydraulic fluid in the external mechanical force field. The results of the experiment show the non-linearity of the physicochemical processes that occur in the working fluid of high pressure of hydraulic actuators and indicate their local character. The text also contains the schematic circuit diagrams of experimental bench and the hydraulic measuring module with the original design, which allow the investigation of physicochemical processes that occur in the working fluid in the gaps of precision friction couples.

**Keywords:** high pressure hydraulic systems, precision friction couples, hydraulic spool, high pressure multiplier, viscosity, hydraulic fluid, hydraulic measuring module, polymerization, polycondensation, mechanical vitrification, destruction of polymers.

Для приведения в действие систем управления летательными аппаратами, обеспечения работы двигателей, а также автоматизации рабочих процессов систем и агрегатов, входящих в конструкцию летательных аппаратов, используют различные гидравлические приводы. В летательных аппаратах широко применяются топливные системы высокого давления и объемные гидравлические приводы рулевых поверхностей. Данные гидравлические системы летательных аппаратов обеспечивают подачу топлива и управление основными системами, определяя безопасность всех этапов полета. Использование гидравлических приводов в системах управления летательными аппаратами вызвано хорошими массогабаритными показателями, высоким быстродействием, малой инерционностью подвижных частей исполнительных механизмов, достаточной надежностью при эксплуатации в широких диапазонах температур и давлений. Для повышения надежности и долговечности гидравлических систем летательных аппаратов необходимо совершенствовать не только конструкции агрегатов, но и составы рабочих жидкостей:

- развивать существующую теоретическую базу, позволяющую прогнозировать физико-химические свойства углеводородных сред в условиях высоких температур и давлений;

- разрабатывать методы моделирования гидродинамических процессов и реологических свойств рабочих сред гидравлических систем, применяемых в авиастроении.

В приводах, используемых для реализации перемещений рулей и элеронов, применяются гидравлические системы, оснащенные как струйными, так и золотниковыми распределителями, а в топливных системах высокого давления широко используются прецизионные плунжерные пары. Эксплуатируемые в системах управления летательных аппаратов гидравлические распределители золотникового типа и плунжерные пары насосов высокого давления должны обеспечивать высокий уровень надежности срабатывания. Считается, что на вероятность отказов подобных систем влияют следующие факторы:

- попадание частиц загрязнителя в зазоры, что вызывает возрастание усилий на перемещение золотников;

- сухое трение и адгезионное схватывание поверхностей.

Вообще на сегодняшний день принято считать, что 70–80 % выходов из строя гидравлических систем и до 90 % поломок подшипни-

ков вызваны загрязненностью рабочей среды. Как правило, в качестве загрязнителя рассматривают инородные частицы, а также нерастворимые продукты износа проточной части гидравлической системы и окисления гидравлического масла [1].

В то же время возможные обратимые и необратимые процессы полимеризации рабочей среды в зазорах пар трения гидравлических приводов высокого давления игнорируются, хотя исследования Е.В. Золотых, проведенные ВНИИФТРИ, показали скачкообразное увеличение вязкости ПФМС-2 при температуре 20 °С и давлении 200 МПа [2]. Наблюдалось аналогичное поведение ПФМС-4 и наличие резкого скачка с перегибом характеристики вязкости при той же температуре, но при давлениях несколько ниже 100 МПа, в больших объемах. МС-20 при аналогичной температуре имеет точку структурного перехода при давлении 260 МПа. Исследования А.С. Ахматова [3] и Б.И. Ершева [4] указывают на наличие физико-химических эффектов, возникающих в пограничных слоях при давлениях гораздо более низких, чем давления фазовых переходов в больших объемах тех же рабочих сред. Некоторые применяемые смазки представляют собой раствор малой концентрации жирных кислот в неполярной среде (масле), а исследования А.С. Ахматова показали, что при постепенном повышении давления внезапно происходит перестройка в структуре граничных слоев стеариновой кислоты, приводящая к более высокой упругости образца при давлениях значительно ниже давлений структурных переходов в больших объемах, исследования проводились методом Блоджет–Ленгмюра [3].

Исходя из вышеизложенного целью проведенного исследования является изучение механизма структурного перехода углеводородных сред в малых зазорах элементов гидравлических систем летательных аппаратов и проверка наличия вклада данных эффектов в увеличение усилий, требуемых на перемещение золотников. В связи с тенденцией уменьшения размеров зазоров в элементах золотниковых пар изучение физико-химических процессов, протекающих в приграничных зонах поверхностей, становится крайне актуальным.

Очевидно, что на надежность гидравлической системы влияет не только полное заклинивание пар трения, но и возрастание усилия страгивания, приводящее к снижению быстродействия привода. Как правило, возрастание усилия страгивания золотника гидравлического распределителя связывают:

– с действием высокого давления в силовых линиях, создаваемого источником давления и приводящего к повышению концентрации частиц износа в зазорах золотников;

– воздействием сил сухого трения золотника на корпус в момент его страгивания;

– остаточной намагниченностью якоря электромеханического преобразователя в магнитных полях управляющих электромагнитов.

В последние десятилетия в автоматизированных системах широко используются гидравлические аппараты высокого класса точности, зазоры, создаваемые подвижными элементами которых находятся в пределах 5–4 мкм, а применительно к золотниковым парам существует требование, чтобы радиальный зазор между золотником и корпусом не превышал 5–10 мкм [5]. Использование подобных высокопрецизионных механических элементов в гидравлических аппаратах не только предъявляет повышенные требования к начальной чистоте рабочих жидкостей и к конструкциям, применяемым в подобных системах устройств фильтрации, но и создает условия для протекания ряда аномальных физико-химических процессов в рабочей среде. Принимая во внимание условия эксплуатации гидравлических масел в приводах, а именно: высокие рабочие давления; существенные динамические нагрузки, приводящие к механической деструкции молекул; значительные тепловыделения в прецизионных парах трения и минимально возможные зазоры между подвижными элементами, размеры которых зачастую не намного больше размеров молекул веществ, входящих в состав рабочей среды, а также многокомпонентный углеводородный состав данной рабочей среды, – целесообразно предположить наличие предпосылок для возникновения различных химических реакций, часть из которых обратима.

Широко известно о возможности протекания фазовых переходов в углеводородных средах при их эксплуатации в гидравлических приводах высокого давления. При этом наличие фазовых переходов отслеживается по факту возникновения нерастворимых частиц или образования структур, приводящих к залипанию пар трения и зарастиванию рабочих отверстий.

Нерастворимые частицы загрязнителя, находящиеся в рабочей жидкости гидравлических систем, отличаются как по своему составу, так и по размерам, поэтому различаются и степени выраженности их

влияния на работоспособность гидравлического оборудования. Аналогичными различиями состава и размера обладают и временные полимерные структуры, возникающие в зазорах прецизионных пар трения, следовательно, и их влияние на рабочие характеристики гидравлической системы также различно. Подобные временные полимерные структуры могут образовываться в результате полимеризации или поликонденсации. Установлено, что процессы поликонденсации и полимеризации могут протекать обратимо или необратимо в зависимости от условий реакции и природы мономеров. Причем обратимость процесса поликонденсации обусловлена прежде всего образованием побочных низкомолекулярных продуктов реакции: воды, аммиака, спирта, хлористого водорода и т.д., но при процессе обратимой полимеризации побочные продукты не образуются [6].

Очевидно, что рабочие нагрузки, которым подвергается гидравлическая жидкость, являются благоприятными условиями для возникновения процессов полимеризации рабочей среды, в том числе и для обратимых процессов полимеризации и поликонденсации. Также очевидно, что наиболее экстремальным динамическим и термическим нагрузкам рабочая среда подвергается в зазорах между подвижными элементами, а высокие рабочие давления потенцируют данные процессы, повышая вероятность их возникновения, поэтому стоит рассматривать подобные явления как локальные аномалии изменения состава и свойств рабочей среды.

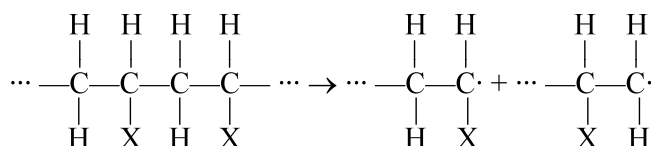
Рабочая среда гидравлического привода по своему химическому составу представляет собой многокомпонентный раствор углеводородных соединений, а в многокомпонентных углеводородных системах происходят сложные реакции, в которых могут одновременно протекать по несколько параллельных и последовательных реакций, причем обратимые реакции могут одновременно протекать в прямом и обратном направлении.

Известно, что обратимость процессов присутствует при ионной полимеризации и поликонденсации углеводородных сред, механизмы данных процессов базируются на равновесном молекулярно-массовом распределении, что соответствует минимуму химического потенциала полимеров в определенных условиях [6], например в условиях высоких рабочих давлений гидравлических приводов и их последующей деполимеризации при снятии давления.

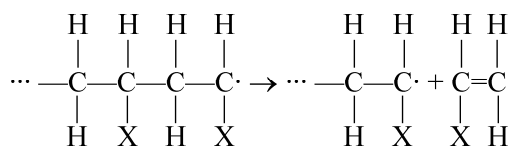
При равновесных молекулярно-массовых распределениях ожидается, что полученная полимерная форма вещества распадется целиком или частично на составные формы меньшего молекулярного веса, из которых она была образована, и что с ростом молекулярного веса прочность полимерных соединений должна резко падать [6, 7]. Следовательно, при достижении полимерным соединением значительной молекулярной массы, в условиях динамических нагрузок и снижения рабочего давления системы, должна повышаться вероятность обратимости процесса образования полимерной структуры. Причем полимерные соединения, полученные в результате поликонденсации, как правило, разлагаются по закону случая, с образованием соединений, которые не всегда являются исходными мономерами, что приводит к изменению химического состава рабочей среды [7].

При процессе полимеризации полимеры образуются за счет соединения большого числа молекул мономера между собой, следовательно, продукт реакции полимеризации – полимер и исходные вещества – мономеры находятся друг с другом в определенной генетической связи, а элементарный состав мономеров и продукта их полимеризации идентичен. Исходя из этого полимер может быть превращен в мономер посредством деполимеризации, но возможность протекания данного обратного процесса зависит от индивидуальных особенностей строения полимера и его термической устойчивости, а также возможности протекания при процессе деполимеризации побочных превращений. Полимеры, полученные в результате процесса полимеризации и имеющие способность к деполимеризации, разлагаются, как правило, по механизму обратимой полимеризации. Рассмотрим стадии разложения полимера, полученного в результате полимеризации [6]:

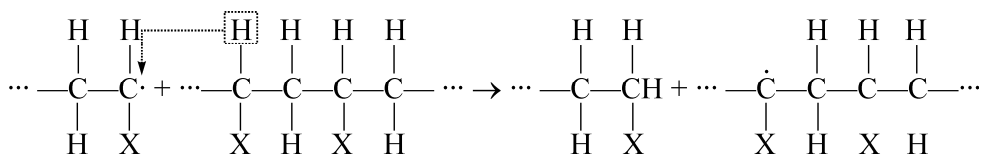
– Инициирование



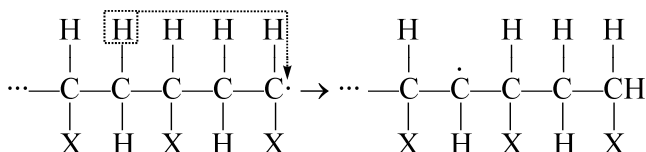
– Рост цепи, первичные радикалы



– Межмолекулярная перегруппировка



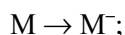
– Внутримолекулярная перегруппировка



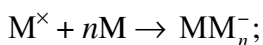
По своей сути процесс полимеризации является частным случаем реакции присоединения, когда большое число одинаковых или разных молекул мономеров присоединяются друг к другу. Процессы полимеризации в рабочей среде многокомпонентного углеводородного состава можно разделить на цепной и ступенчатый синтез полимеров [7].

Цепной процесс полимеризации состоит из трех элементарных процессов:

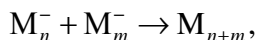
1) образования активного центра



2) роста цепи



3) обрыва цепи



где  $M$  – мономер;  $M^{\cdot}$  – активная молекула.

Ступенчатые процессы полимеризации значительно отличаются от цепных процессов полимеризации. Ступенчатый процесс полимеризации является процессом взаимодействия функциональных групп и молекул мономера и протекает поэтапно с образованием димеров, тримеров, тетрамеров и последующих полимергомологов. При ступенчатых процессах полимеризации промежуточные продукты реакции устойчивые, стабильные молекулярные продукты, а при цепных процессах полимеризации промежуточные продукты реакции неустойчивые: свободные радикалы и ионы с малым временем жизни. Поскольку после каждого присоединения функциональных групп к цепи растущая цепь

полимера остается устойчивым молекулярным соединением, а сам процесс образования полимера протекает поэтапно, с постепенным увеличением молекулярной массы, следовательно, ступенчатый процесс полимеризации протекает по реакциям концевых функциональных групп молекул мономеров или олигомеров. В зависимости от числа функциональных групп в исходных молекулах, от двух и более, могут образовываться линейные, разветвленные или сетчатые молекулярные структуры конечных продуктов ступенчатой полимеризации [7, 8].

Еще одно характерное отличие цепных процессов полимеризации от ступенчатых заключается в том, что изменение молекулярной массы полимеров при ступенчатом процессе является постепенным и ее рост происходит по мере превращения реагентов. В связи с этим размеры молекул полимеров при ступенчатом процессе изменяются во времени, а при цепном процессе полимеризации образование конечных по размеру макромолекул полимеров происходит практически мгновенно и их размеры остаются неизменными во времени. Но превращения реагентов в ступенчатых процессах полимеризации протекают с достаточно высокой скоростью, так как исходные мономеры быстро расходуются на образование димеров, тримеров, тетрамеров и т.д. На каждом этапе ступенчатого процесса полимеризации образуются молекулы, сохраняющие способность в данных условиях вступать в реакцию дальнейшего присоединения функциональных групп, но в отличие от реакции поликонденсации при ступенчатой полимеризации не происходит образования побочных продуктов, а процесс останавливается, когда система становится равновесной [8].

Вообще структурные изменения являются обратимым процессом, при котором одновременно могут протекать как механизмы присоединения молекул мономера к активному центру, так и механизмы отщепления мономера от него, что можно утверждать, основываясь на следующих фактах:

– Доказано, что процессы полимеризации и деполимеризации могут быть вызваны при помощи одних и тех же методов инициирования [3, 7].

– В некоторых химических системах полимеризация может протекать только до определенной глубины превращения мономера [5].

– В случае проведения полимеризации при достаточно высоких температурах константа скорости роста цепи с повышением температуры реакции начинает падать, стремясь к нулю [5].



Направление протекания реакции при заданных условиях определяется термодинамическими характеристиками компонентов системы, а реакция будет протекать в сторону уменьшения свободной энергии системы, стремясь к равновесному состоянию, которое соответствует состоянию минимума свободной энергии. Скорости протекания процессов полимеризации и деполимеризации будут определяться кинетическими факторами: реакционной способностью активных центров, концентрацией реагентов, наличием или отсутствием стерических затруднений. В целом, так как в идеале процесс полимеризации – обратимый процесс, полимеризация и деполимеризация являются не самостоятельными процессами, а всего лишь частями одного сложного процесса [3–5].

Учитывая наличие в составе гидравлических масел ароматических и прочих циклических соединений [9], необходимо отметить, что независимо от механизма инициирования ионная полимеризация циклических соединений является обратимым процессом, поэтому в рабочих средах, в состав которых входят подобные соединения, возможно возникновение временных полимерных структур, в условиях роста рабочего давления и интенсивности динамических нагрузок.

Естественно, что многокомпонентный углеводородный состав гидравлических масел создает предпосылки для протекания в их объеме совместно с процессами полимеризации или независимо от них процессов поликонденсации.

В химической теории процесс поликонденсации принято считать частным случаем реакции замещения, в которой оба реагирующих компонента должны являться не менее чем бифункциональными веществами. Сам процесс поликонденсации, в результате которого образуются цепи полимеров, идет ступенчато и основан на обратимых бимолекулярных реакциях обмена, в которых обратной реакцией является процесс химической деструкции. Для протекания данных процессов требуется, чтобы исходное вещество и продукты реакции находились в особо активном состоянии, поэтому их инициация происходит при условиях повышенных температур и давлений или в присутствии катализаторов [8]. Процессы поликонденсации свойственны предельным органическим соединениям, имеющим в своей структуре особо активные функциональные группы атомов, к ним относятся, например, такие полярные группы, входящие в состав компонентов рабочих жидко-

стей, как:  $-\text{OH}$ ,  $-\text{CHO}$ ,  $-\text{Cl}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{Br}$ ,  $-\text{NO}_2$ . Данные полярные группы способны вступать в обменное взаимодействие с выделением простейших продуктов реакций [9]. При поликонденсации рост макромолекулы, в теории, прекращается только после того, как прореагируют все функциональные группы всех мономеров, а также всех промежуточных продуктов реакции. В результате этого образуется одна макромолекулярная структура, но по факту в полученной полимерной структуре присутствует выраженная молекулярная полидисперсность и значительный объем поликонденсата, состоящего из молекул, отличающихся друг от друга по степени полимеризации. Необходимо отметить и то, что средний молекулярный вес линейных полимерных структур, образованных при самых благоприятных условиях протекания поликонденсации, как правило, намного ниже молекулярного веса линейных полимеров, образующихся при полимеризации. Подобное явление можно объяснить течением ряда побочных химических процессов и ростом числа пространственных затруднений по мере увеличения молекулярной массы полимерной структуры, в результате чего процесс поликонденсации останавливается, не протекая до конца [3–8]. Также в условиях динамических нагрузок, оказываемых на молекулы рабочих жидкостей, образующиеся в процессе роста цепи подвержены механической или термической деструкции, что увеличивает вероятность обрыва цепи при процессе поликонденсации.

В случае присутствия в рабочей среде линейных молекул с функциональностью более двух и их участия в процессе поликонденсации, совместно с мономерами, которые по своей структуре способны производить линейный полимер, могут образовываться линейные сшитые пространственные полимерные структуры, подобные сшитым полимерным структурам, получающимся в процессе полимеризации. Данным полимерным соединениям свойственна линейная структура макромолекул, но с более или менее густой шивкой между цепями [10]. В случае отсутствия в рабочей среде молекул компонентов, имеющих линейные структуры с соответствующей минимальной длиной цепи (но один из имеющихся компонентов имеет функциональность более 2), в результате реакции поликонденсации образуются пространственные полимерные соединения не с линейной-сетчатой, а с глобулярной структурой [9]. Вообще реакции образования поперечных химических связей между макромолекулами, которые приводят к получению по-

лимеров пространственного строения и увеличению степени полимеризации полимера, называют реакциями сшивания.

Реакции сшивания могут протекать в процессе образования новых полимерных структур, а также у уже существующих линейных полимеров, при этом сшивание полимерных цепей приводит к получению нерастворимых и неплавких полимерных структур. Хотя при небольшом количестве поперечных связей образуется редкая сетка и получаются мягкие эластичные полимерные соединения, с ростом числа мостиковых связей жесткость полимерного материала увеличивается, поэтому образование очень частой сетки приводит к получению структур, обладающих значительной твердостью [10]. Поперечные химические связи в полимерах, присутствующих в гидравлических маслах, могут образовываться и непосредственно между атомами углерода соседних макромолекул, без участия каких-либо веществ или при содействии различных химических веществ, находящихся в углеводородном растворе, например серы.

Вообще сшивка макромолекул происходит в случаях:

- взаимодействия функциональных групп или атомов различных макромолекул;
- воздействия на линейные полимеры сшивающих агентов – определенных низкомолекулярных соединений.

Причем в результате взаимодействия функциональных групп или атомов у различных макромолекул образуется достаточно малое число мостиков, а сам процесс сшивки сопровождается побочными реакциями деструкции [10]. Очевидно, что причиной образования сшивок в рабочей среде зачастую являются присадки, вводимые в гидравлические масла для улучшения их реологических характеристик.

Необходимо рассмотреть и влияние размеров зазора прецизионных пар трения на процессы полимеризации рабочей среды. Многокомпонентные гидравлические масла включают в себя различные углеводородные соединения, обладающие разной молекулярной массой, низкомолекулярная часть которых выступает в роли жидкости носителя и своеобразной смазки для высокомолекулярных соединений, размеры молекул которых зачастую не намного меньше или даже равны размерам зазоров между прецизионными парами трения. Попадание подобных высокомолекулярных частиц совместно с потоком низкомолекулярных соединений в зазоры, например золотниковых пар, и по-

следующее вытеснение из зазора низкомолекулярных соединений под действием сдвиговых напряжений, образующихся при перемещениях золотника, сопровождается дальнейшим накоплением в зазоре высокомолекулярных соединений, размеры которых близки к размерам самого рабочего зазора золотниковой пары. При накоплении данных высокомолекулярных соединений в рабочем зазоре возможно, в случае резкого скачка давления, образование из них временных или даже постоянных полимерных структур, что приведет к залипанию или заклиниванию золотниковой пары. Так, при изучении утечек в зазорах гидравлических аппаратов [4] были получены экспериментальные данные, приведенные на рис. 1.

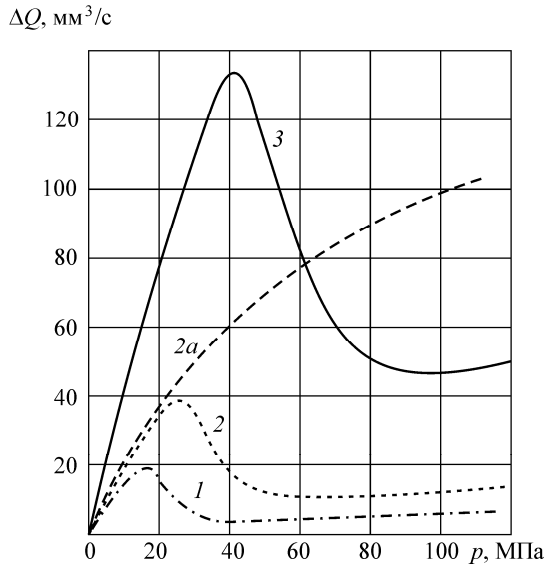


Рис. 1. Изменение величины утечек рабочей жидкости в зависимости от давления в статических условиях при радиальных зазорах 11 (1), 13 (2), 19 (3) мкм; 2a – теоретическая зависимость утечек от давления при зазоре 13 мкм; данные Б.И. Ершева [4]

Реакции полимеризации в силовых полях, в том числе и механических, довольно широко распространены в процессе эксплуатации гидравлических систем высокого давления [11]. Рассмотрим влияние высоких давлений на течение процессов образования полимерных структур в рабочей среде гидравлических приводов. Вообще основным требованием для инициации химических превращений является возникновение необходимого условия для перераспределения электронной плотности столкнувшихся частиц. Причем инициация химической

реакции требует передачи количества энергии, достаточного для образования или разрушения химической связи [12], как правило, независимо от природы источника данной энергии. Известно, что при помощи изменений давления возможно смещение равновесия в химической системе, т.е. и потенцирование протекающих процессов или изменение их направления течения.

Однако, как известно, динамическая вязкость среды численно связана с плотностью коэффициентом кинематической вязкости согласно выражению  $\eta = \nu \rho$  [11].

Таким образом, очевидно, что при возникновении вязкостных аномалий в среде, наличие которых подтверждено в результате множественных независимых экспериментов [2–4, 12–18], изменение вязкости, а следовательно, и плотности под действием высоких давлений должно иметь нелинейный характер [2]. Этот эффект вероятней всего не связан с линейными размерами образующихся в рабочей среде молекулярных структур, как следует из существующих в химии методов расчета плотности полимерных структур [13], а является следствием дальнейших химических реакций, протекающих при росте давления в системе и приводящих к изменению качественного состава рабочей среды в пограничном слое.

Для подтверждения наличия данного эффекта проведем натуральный эксперимент. Рассматривая конструкционные схемы установок исследователей, работавших в этом направлении [2–4], необходимо заметить, что в большинстве работ реализован перепад давления на золотниках, что не дает возможности полностью исключить движение в золотниковом зазоре частиц загрязнений. Кроме того, приведенные в работе [2] данные о распределении давления в зазоре плунжерной пары показали целесообразность помещения всей измерительной ячейки в полость высокого давления, что и было реализовано в нашей установке. Исследовалась плунжерная пара с наружным диаметром золотника 5,5 мм, длиной рабочей части 20 мм и зазором 15 мкм, с допуском на размер 4 мкм. В этих условиях статическое давление в зазоре 15 мкм плунжера равномерно и может изменяться от 10 до 200 МПа, при этом доля динамического перепада давлений в зазоре, по данным источника [1], не превышает при исследуемых режимах 0,7–0,9 МПа. Привод золотника осуществлялся возвратно-поступательно, поочередно двумя намотанными катушками с фторопластовой изоля-

цией, не залитыми компаундом. Контроль положения плунжера реализован по схеме трехкатушечного индукционного датчика перемещения, катушки которого также имели открытую фторопластовую изоляцию. Для определения мощностной характеристики в цепь каждой из силовых катушек установлен токовый датчик ИС ACS712, модуль опроса датчика положения типа LS5-15/10-232-2-V-(12-24)-А. По значению токового сигнала, напряжения на катушке и положения сердечника производился расчет вебер-амперной характеристики, учет влияния зазора осуществлялся путем сравнения с характеристикой, полученной при установке вместо плунжера дистанционного стержня диаметром 3 мм и равной с плунжером длины. Рабочий ход плунжера не регулируется и составляет 3 мм, допускаемая частота перемещения 1–100 Гц. Поправка на изменение сопротивления обмотки вносилась по результатам статического нагружения. Оценка давления в контейнере осуществлялась манганиновыми манометрами, включенными по схеме моста сопротивлений, работающими с блоком преобразования на инструментальном усилителе НХ711. Измерительный модуль, помещаемый в предварительно заполненный жидкостью объем камеры высокого давления, имеет длину 130 мм и диаметр 28 мм. Зона токовыводов служит крышкой блока высокого давления.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Установка состоит из управляющих магнитов 1, плунжера 2 и датчика положения 3. Данная конструкция измерительного модуля в сборке помещается в мультипликатор высокого давления (рис. 3).

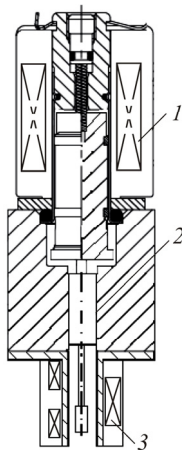


Рис. 2. Конструкция измерительного модуля

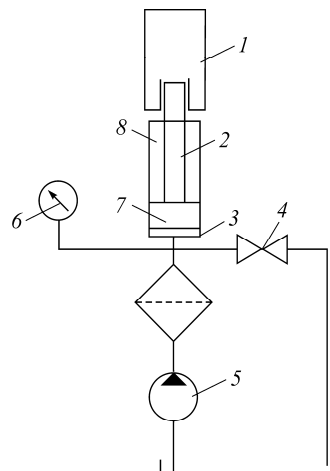


Рис. 3. Мультипликатор высокого давления

Мультипликатор высокого давления содержит: камеру высокого давления 1, плунжер 2, камеру низкого давления 3, запорный элемент 4, насос 5, манометр 6, поршень 7 и воздушную камеру 8. Оценка изменения вязкости рабочей среды в зазоре, с ростом давления в системе, производилась посредством измерения потребляемой электромагнитом мощности, требуемой для осуществления перемещения плунжера, а характер перемещения оценивался индукционным датчиком положения, жестко связанным с плунжером.

В качестве среды, заполняющей рабочий зазор пары трения, использовались образцы масел И-30 и АМГ, являющихся по своему химическому составу многокомпонентной углеводородной системой с комплексом неорганических присадок. Класс предварительной очистки 7 (по стандарту NAS) исключал наличие абразивного износа в исследуемом зазоре. На основании полученных экспериментальных данных построена графическая зависимость (рис. 4).

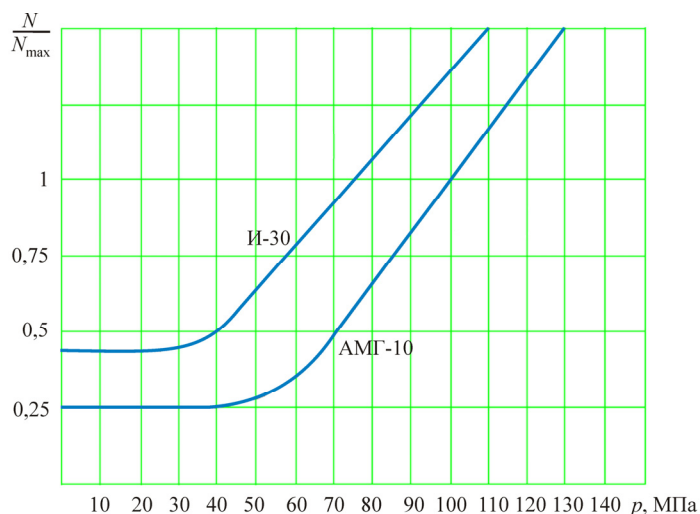


Рис. 4. Зависимость потребляемой системой мощности от рабочего давления

Приведенная графическая зависимость показывает нелинейность изменения мощности, потребляемой системой для осуществления перемещения плунжера, с ростом давления в системе, иллюстрируя тем самым нелинейность изменения вязкости рабочей среды в зазоре. Причем аномального изменения вязкости в большом объеме этой же среды не зафиксировано. Из проведенного исследования становится очевид-

ным, что игнорирование процессов полимеризации рабочей среды в пристеночной зоне зазоров золотников недопустимо, а наличие описанных эффектов значительно усложняет численное моделирование рабочих процессов гидравлических приводов высокого давления летательных аппаратов и расчет их оптимальных рабочих параметров. Это создает необходимость проведения натурного моделирования условий эксплуатации элементов гидравлических приводов и требует дальнейшего развития методов математического моделирования процессов полимеризации рабочих сред гидравлических систем высокого давления.

### Библиографический список

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) / Моск. сельскохоз. академия. – М., 2001. – 616 с.
2. Золотых Е.В. Исследования в области высоких давлений. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 303 с.
3. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Ершов Б.И. Утечки жидкости в узлах гидростатических машин и устройств // Вестник машиностроения. – 1987. – № 1. – С. 25–27.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) / Моск. сельскохоз. академия. – М., 2002. – 632 с.
6. Грасси Н. Химия процессов деструкции полимеров. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1959. – 253 с.
7. Харитонов Ю.Я. Физическая химия. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. – 608 с.
8. Эрих В.Н. Химия и технология нефти и газа. – Л.: Химия, 1977. – 424 с.
9. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 246 с.
10. Ершов Ю.А. Коллоидная химия. Физическая химия дисперсных систем. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. – 352 с.
11. Скородумов В.Ф. Термодинамические аспекты стеклования под давлением // Журнал физической химии. – 1994. – Т. 68, № 12. – С. 2254–2256.
12. Беляев А.П. Физическая и коллоидная химия. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. – 752 с.



13. Аскадский А.А., Кондрашенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.

14. Иоселевич В.А. Микро- и макрогидродинамика полимерных растворов // Механика и научно-технический прогресс. – М.: Наука, 1987. – Т. 2. – С. 146–163.

15. Фройштетер Г.Б., Данилевич С.Ю., Радионова Н.В. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.

16. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. – Киев: Вищ. шк., 1976. – 185 с.

17. Бриджмен П.В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва: пер. с англ. – М.: Мир, 1955. – 467 с.

18. Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких давлениях. – М.: Химия, 1965. – 416 с.

### References

1. Garkunov D.N. Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost) [Tribotechnology. Deterioration and no deterioration]. Moskovskaya selskokhozyaystvennaya akademiya, 2001. 616 p.

2. Zolotykh E.V. Issledovaniya v oblasti vysokikh davleniy [Research in the field of high pressure]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1987. 303 p.

3. Akhmatov A.S. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya [Molecular physics of boundary friction]. Moscow: Fizmatgiz, 1963. 472 p.

4. Ershov B.I. Utechki zhidkosti v uzlakh gidrostaticheskikh mashin i ustroystv [Leakage of fluid in the hydrostatic units of machines and devices]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 1987, no. 1, pp. 25-27.

5. Garkunov D.N. Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin) [Tribotechnology. Design, manufacture and operation of the machines]. Moskovskaya selskokhozyaystvennaya akademiya, 2002. 632 p.

6. Grassi N. Khimiya protsessov destruktсии polimerov [Chemistry of polymer degradation processes.]. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1959. 253 p.

7. Kharitonov Yu.Ya. Fizicheskaya khimiya [Physical chemistry]. Moscow: GEOTAR-Media, 2013. 608 p.

8. Erikh V.N. Khimiya i tekhnologiya nefti i gaza [Chemistry and technology of oil and gas]. Leningrad: Khimiya, 1977. 424 p.

9. Grassi N., Skott J. Destruktsiya i stabilizatsiya polimerov [Degradation and stabilization of polymers]. Moscow: Mir, 1988. 246 p.

10. Ershov Yu.A. Kolloidnaya khimiya. Fizicheskaya khimiya dispersnykh sistem [Colloid chemistry. Physical chemistry of disperse systems]. Moscow: GEOTAR-Media, 2013. 352 p.

11. Skorodumov V.A. Termodinamicheskiye aspekty steklovaniya pod davleniyem [Thermodynamic aspects of vitrification under pressure]. *Journal of Physical Chemistry*, 1994, vol. 68, no. 12, pp. 2254-2256.

12. Belyaev A.P. Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya [Physical and colloid chemistry]. Moscow: GEOTAR-Media, 2014. 752 p.

13. Askadskiy A.A., Kondrashenko V.I. Kompyuternoe materialovedenie polimerov. Tom 1. Atomno-molekulyarnyy uroven [Computational materials engineering for polymers. Vol. 1. Atomic-molecular level]. Moscow: Nauchnyy mir, 1999. 544 p.

14. Ioselevich V.A. Mikro- i makro gidrodinamika polimernykh rastvorov [Micro and macro hydrodynamics of polymer solutions]. *Mekhanika i nauchno-tekhnicheskiiy progress*. Moscow: Nauka, 1987. Vol. 2, pp. 146-163.

15. Frayshteter G.B. Danilevich S.Yu., Rodionova N.V. Techeniye i teploobmen nenyutonovskikh zhidkostey v trubakh [Flow and heat transfer of non-Newtonian fluids in the pipes]. Kiev: Naukova dumka, 1990. 216 p.

16. Yakhno O.M., Dubovitskiy V.F. Osnovy reologii polimerov [Rheological fundamentals of polymers.]. Kiev: Vishchaya shkola, 1976. 185 p.

17. Bridzhmen P.V. Issledovaniya bolshikh plasticheskikh deformatsiy i razryva [The study of large plastic deformations and rupture]. Moscow: Mir, 1955. 467 p.

18. Tsiklis D.S. Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh davleniyakh [The techniques for physico-chemical studies at high pressures]. Moscow: Khimiya, 1965. 416 p.

### Об авторах

**Найгерт Катарина Валерьевна** (Челябинск, Россия) – инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, e-mail: kathy\_naigert@mail.ru).

**Редников Сергей Николаевич** (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, e-mail: srednikov@mail.ru).

**Япарова Наталья Михайловна** (Челябинск, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, e-mail: ddjy@math.susu.ac.ru).

### **About the authors**

**Katharina V. Naigert** (Chelyabinsk, Russia Federation) – Engineer, Department of Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (National Research University) (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: kathy\_naigert@mail.ru).

**Sergey N. Rednikov** (Chelyabinsk, Russia Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (National Research University) (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: srednikov@mail.ru).

**Natalya M. Yaparova** (Chelyabinsk, Russia Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, South Ural State University (National Research University) (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: ddjy@math.susu.ac.ru).

Получено 22.11.2015