

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

© 2014 В.И. Санчугов, В.М. Решетов, С.В. Турусин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 14.04.2014

Представлены основные требования промышленной чистоты, приведен анализ технологий очистки внутренних поверхностей гидроцилиндров. Рассмотрены возможности и ограничения очистки гидроцилиндров пульсирующим потоком жидкости

Ключевые слова: очистка, промывка, гидроцилиндр, гидродинамическая очистка, пульсирующий поток.

Технический прогресс в машиностроении, усложнение конструкции и расширение рабочих функций машин при одновременно значительном повышении требований к их ресурсу и эксплуатационной надежности поставили проблему высокоэффективной очистки деталей, агрегатов и систем машин в ряд наиболее важных проблем современной техники и технологии.

Современные гидравлические системы - это сложнейшие функциональные системы, обеспечивающие выполнение многочисленных и ответственных задач.

По данным статистических материалов отечественных и зарубежных исследований до 50% отказов гидравлических систем обусловлено наличием в рабочей жидкости загрязнений. Загрязнениями в жидкости считаются все твердые посторонние частицы, включая нерастворимые продукты смолообразования, органические вещества, колонии бактерий и продукты их жизнедеятельности, содержание которых регламентируется ГОСТ 17216-2001, ГОСТ 6370-83 [1, 2], а также растворенные или находящиеся в свободном состоянии воздух и вода.

Нормативные документы устанавливают жесткие требования к чистоте рабочих жидкостей в гидравлических системах.

С одной стороны, обеспечение высокого уровня чистоты рабочих жидкостей - это залог обеспечения необходимого уровня надежности и ресурса гидравлических систем в эксплуатации.

С другой стороны, обеспечение чистоты рабочих жидкостей - это трудоёмкие, длительные

*Санчугов Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации авиационной техники.
E-mail: unikon@ssau.ru*

*Решетов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, заведующий учебно-научной лабораторией кафедры автоматических систем энергетических установок.
E-mail: vmresh@rambler.ru*

*Турусин Сергей Васильевич, аспирант.
E-mail: unikon@ssau.ru*

и весьма затратные технологии, сопровождающие весь цикл производства агрегатов гидравлических систем, начиная с производства отдельных деталей, узлов и заканчивая отработкой полностью собранных сложнейших агрегатов.

Необходимую степень чистоты внутренних поверхностей элементов гидросистем и рабочих жидкостей устанавливают на основании изучения влияния размера, концентрации, природы и твердости частиц загрязнений на показатели надежности и долговечности наиболее ответственных деталей и узлов машин. Кроме этого следует учитывать величины зазоров в сопрягаемых деталях гидроагрегатов, скорости взаимного перемещения деталей, твердость и шероховатость их поверхностей, величины рабочего давления и температуры жидкости. Это свидетельствует о том, что нормирование чистоты жидкости для каждой системы или класса является сложной задачей. Вместе с тем требования не должны быть чрезмерно жесткими, так как увеличение чистоты жидкости приводит к увеличению затрат на фильтрацию. При повышении чистоты жидкости в два раза (при переходе к каждому последующему классу чистоты) затраты на ее очистку (фильтрацию) примерно удваиваются. Вместе с тем, практика обеспечения промышленной чистоты показывает, что ресурс элементов гидросистемы может быть увеличен, а затраты на ее обслуживание и ремонт снижены, если для очистки рабочей жидкости применять устройства с абсолютной тонкостью фильтрации, равной 3...5 мкм.

Проблема промышленной чистоты машин в настоящее время решается благодаря применению при их производстве и эксплуатации специальных методов и средств очистки деталей, узлов, агрегатов и систем и соответствующим образом организованной системы контроля чистоты. При этом широко используются фильтры тонкой очистки, а также высокоэффективные очистители, основанные на применении си-

ловых полей (центробежного, магнитного, электростатического). Основным же направлением решения проблем чистоты является разработка и исследование новых эффективных методов и средств очистки рабочих полостей, рабочих и технологических жидкостей, в результате чего ресурс может быть увеличен в 2..3 раза [3].

Традиционно очистка внутренней поверхности гидроагрегатов стационарным потоком рабочей жидкости заключается в следующем:

- подача рабочей жидкости с рабочим давлением от насосной станции к технологическому стенду очистки;
- фильтрация рабочей жидкости на выходе насосной станции до чистоты, превышающей требуемую чистоту агрегата на 1...2 класса по ГОСТ 17216-2001;
- подвод очищенной жидкости в полость агрегата;
- прокачка жидкости через систему или агрегат в течение определенного времени;
- очистка вытекающей жидкости из полости агрегата.

Схема очистки прокачкой жидкости представлена на рис. 1

До середины 80-х годов в промышленности повсеместно использовалась очистка стационарным потоком. Однако, такие методы имеют не только существенные недостатки, но и в ряде случаев способствуют получению искаженной информации. Так, в производстве известны ситуации, когда из заведомо “грязного” агрегата или системы вытекает чистая промывочная жидкость, и даже случаи, когда вытекающая жидкость оказывается чище, чем жидкость, поступающая на вход изделия из промывочного стенда. Объясняется это тем, что контроль чистоты жидкости производится при уменьшенном расходе, процесс сопровождается не чисткой, а загрязнением агрегата за счёт осаждения частиц на внутренние поверхности.

Ужесточение требований к чистоте рабочих жидкостей привело к поиску новых технологий очистки агрегатов. Стали появляться газожидкостные методы очистки, ультразвуковые, гидродинамические и другие методы очистки. Наибольшее распространение стали приобретать гидродинамические технологии очистки. Особенностью этих технологий является наложение на стационарный поток жидкости переменной составляющей расхода, характеризующейся различными значениями частоты, амплитуды гармонических колебаний, а также использование более сложных полигармонических колебаний. Основное преимущество гидродинамических (пульсационных) технологий при очистке трубопроводов заключается в перестроении профиля течения жидкости, при котором максимум скорости потока смещается к стенке трубопровода, чем и обусловлен рост касательных напряжений жидкости о стенку трубопровода и повышение эффективности отрыва частиц загрязнений (рис. 2).

Возникающие возвратные пристеночные течения приводят к уменьшению толщины пограничного слоя жидкости, что неизбежно ведёт к снижению потребной для очистки средней скорости жидкости. Кроме того, на процесс очистки влияют механические деформации очищаемого изделия, возникающие под действием переменного давления жидкости.

Одним из направлений в развитии технологий очистки стало появление метода прокачки жидкости с наложением вибрации на корпус агрегата. Этот метод по данным некоторых предприятий дает дополнительный эффект по сравнению с рассмотренными ранее способами. Однако, научного обоснования и количественной оценки эффективности данный метод не имеет. Тем более, что с энергетической точки зрения он явно нецелесообразен.

Наибольший вклад в обеспечение чистоты гидроагрегатов внесли А. Н. Свиридов, В. И. Де-

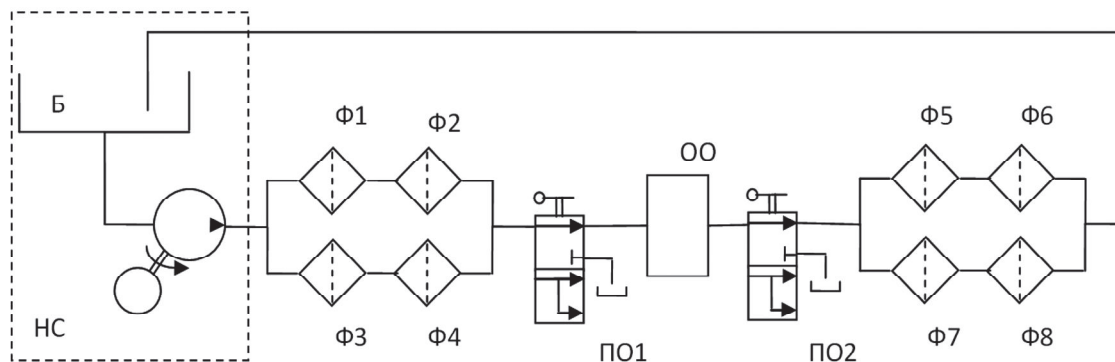


Рис. 1. Структурная схема очистки агрегатов прокачкой жидкости:

НС – насосная станция; Ф1...Ф4 – фильтры в линии нагнетания; ОО – объект очистки; ПО1, 2 – измеряющее устройство чистоты жидкости; Ф5...Ф8 – фильтры в линии слива

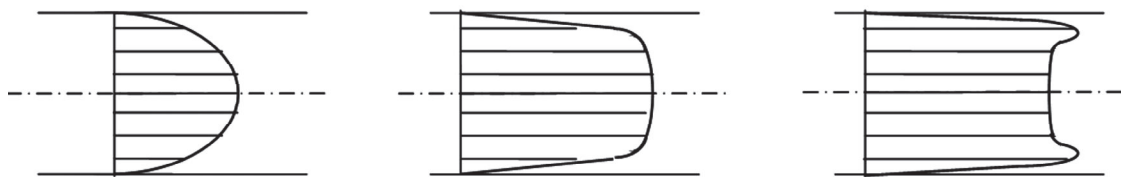


Рис. 2. Эпюры скоростей жидкости при различных режимах течения жидкости:
 а – при ламинарном потоке; б – при турбулентном потоке; в – при пульсирующем потоке жидкости

рябин, Р. Г. Тимиркеев, В. М. Данилов, В. М. Ваганов, В. И. Санчугов и другие [3, 4, 5, 6].

Исследования А.Н. Свиридова посвящены разработке теоретической модели процесса удаления частиц с поверхности, учитывающей взаимосвязи сил, действующих на частицы, с касательными напряжениями потока жидкости на поверхности. Установлено, что гидродинамическая сила, действующая на частицы, находящиеся на стенке, при турбулентном потоке жидкости пропорциональна осредненному касательному напряжению на стенке. Получены зависимости, характеризующие распределение касательных напряжений при стационарном движении однородной жидкости на стенках цилиндрических и сферических полостей, а также на дне тупиковых каналов и в угловых зонах каналов с резким расширением сечения. При использовании пульсаций расхода жидкостей установлено, что касательные напряжения на поверхностях каналов превышают стационарные касательные напряжения более чем в 10 раз за счет деформации профиля скоростей, максимум которых смещается к стенкам каналов.

Прошедшие годы со времени опубликования исследований А.Н. Свиридова показали, что основными выводами, которые могут быть использованы для разработки новых гидродинамических технологий очистки, являются следующие:

- амплитуда касательного напряжения на стенках гидроагрегатов при использовании пульсирующего течения жидкости значительно пре-

вышает касательные напряжения при стационарном течении;

- максимальное количество частиц (до 100 %) отрывается от стенок непрямолинейных каналов только при создании пульсирующих потоков;

- увеличение амплитуды пульсирующего течения приводит к росту касательных напряжений на стенках агрегатов.

Гидравлические силовые цилиндры являются наиболее распространенным видом исполнительных механизмов, служащих для осуществления возвратно-поступательных прямолинейных перемещений.

С точки зрения обеспечения чистоты рабочей жидкости и полостей гидравлической системы гидроцилиндры являются источниками и накопителями загрязнений. Это объясняется наличием трущихся поверхностей и практически очень малым расходом рабочей жидкости через агрегат. За один рабочий ход из гидроцилиндра выталкивается объем жидкости, равный объему его внутренней полости. Этого объема жидкости зачастую недостаточно, чтобы перенести частицы из полости гидроцилиндра до фильтрующих элементов. Расход через гидроцилиндр ограничен скоростью переключок штока, а также длиной гидролиний (а-б), (с-д) от цилиндра Ц до распределителя Р (рис. 3.).

Характерной особенностью гидроцилиндра как объекта очистки является также наличие зам-

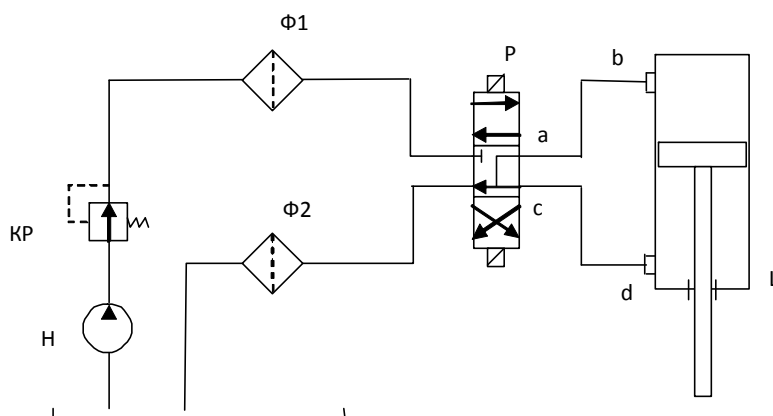


Рис. 3. Принципиальная схема гидропривода.

Н – насос; КР – клапан редукционный; Ф – фильтр; Р – распределитель потока; Ц – цилиндр

кнутых полостей сложной формы, разные значения объёмов полостей при крайних положениях штока, изменение объёма полости при движении штока. Поэтому чистоте рабочих полостей гидроцилиндра уделяется особое внимание в производстве и эксплуатации.

Анализ областей применения и оценка ограничения различных методов очистки полостей цилиндра определяется его конструктивными, технологическими и прочностными особенностями, а оценка эффективности производится по количеству вынесенных частиц с единицы поверхности цилиндра (или с единицы объёма полости). Поскольку интенсивность отрыва частиц загрязнения напрямую связана со скоростью течения жидкости на входе в полость, то в качестве косвенного критерия эффективности можно выбрать скорость жидкости в канале на входе в полость u_{ax} .

Стационарная очистка полостей гидроцилиндра, осуществляемая по обычной схеме гидропривода (рис. 3) путем многочисленных переключений штока цилиндра, является малоэффективной. Это объясняется тем, что скорость течения жидкости на входе в цилиндр, определяемая скоростью перемещения штока, как правило, не превышает 5...10 м/с (рис. 4). На рис. 4 представлены расчётные данные скорости течения на входе в цилиндр более чем сотни отечественных конструкций, используемых в авиационной промышленности.

Гидродинамическая очистка пульсирующим

поток жидкости [7] позволяет развивать скорости течения на входе в гидроцилиндр до 150...170 м/с. Объясняется это упругостью жидкости и высокими значениями уровня колебания давления жидкости в полостях гидроцилиндра. Наглядное представление о достигаемых скоростях течения жидкости в канале на входе в агрегат дают расчёты, представленные на рис. 5, где представлены значения скорости жидкости в фазе нагнетания при различных диаметрах магистрали.

В полостях непроточных агрегатах, к которым можно отнести и гидроцилиндры, периодическое течение жидкости реализуется под действием переменного давления на входе и полностью обусловлено сжимаемостью жидкости и податливостью стенок конструкции агрегата. При этом постоянный расход жидкости отсутствует, а пульсирующий расход целиком и полностью определяет увеличение давления в полости очищаемого агрегата. Увеличение давления ΔP в агрегате при подаче в него порции жидкости объёмом ΔV определяется выражением [4]:

$$\Delta P = E_{жс} \frac{\Delta V}{V_{00}}, \quad (1)$$

где $E_{жс}$ – модуль упругости жидкости;

ΔV – приращение объёма;

V_{00} – приведенный объём полости агрегата.

Если же на входе в заполненный жидкостью агрегат давление повышается скачкообразно на величину $\Delta P = P_{20} - P_{10}$, то процесс изменения

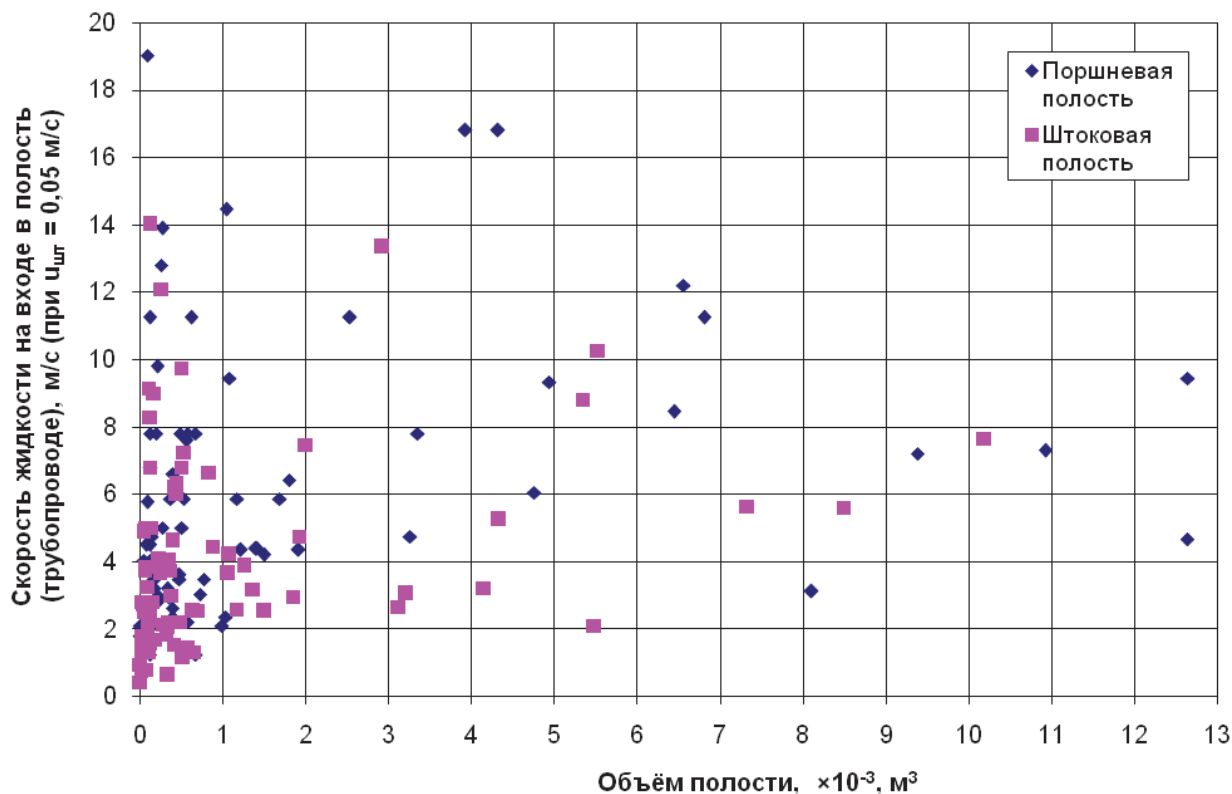


Рис. 4. Скорость жидкости на входе в полость цилиндра при скорости перемещения штока $u_{шт} = 0,05$ м/с

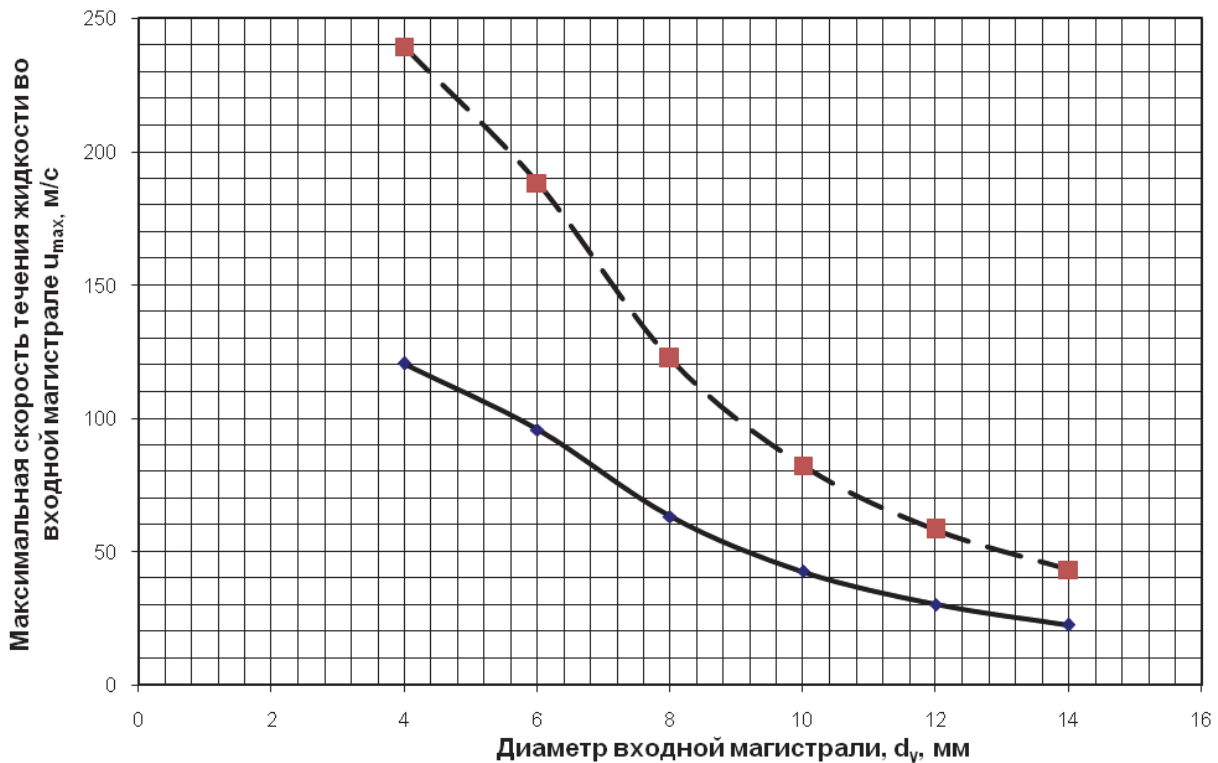


Рис. 5. Достижимые скорости течения жидкости на входе в объект очистки ($V_{п} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $f_{цн} = 50 \text{ Гц}$) при $P_{нагн} = 10 \text{ МПа}$ (—) и $P_{нагн} = 20 \text{ МПа}$ (- - -)

давления и расхода в агрегате и подводящей магистрали определяется динамическими свойствами агрегата и самой магистрали. Высокая добротность сосредоточенных полостей гидроцилиндра, их соединительных каналов и трубопроводов стендовых систем позволяет реализовать режимы резонансного усиления колебаний жидкости в процессе очистки. А это, в свою очередь, позволяет повысить эффективность очистки при меньших энергетических затратах. Импеданс резонансной системы “соединительные каналы – полость гидроцилиндра” может быть определен по формуле:

$$Z_c = \text{Re } Z_c + j \text{Im } Z_c = \text{Re } Z_c + j \left[\left(\rho \omega \sum_{i=1}^n \frac{\ell_i}{S_i} \right) - \left(\frac{\rho a^2}{\omega V_{oo}} \right) \right], \quad (2)$$

где $\text{Re } Z_c, \text{Im } Z_c$ – вещественная и мнимая части импеданса системы;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

ρ – плотность жидкости;

a – скорость звука в жидкости;

ℓ, S – длина и площадь поперечного сечения подводящего трубопровода;

V_{oo} – приведенный объем полости промываемого агрегата.

Резонанс наступает при равенстве мнимой части импеданса нулю, т.е. при частоте возбуждаемых колебаний жидкости равной собственной частоте резонатора.

$$\omega_0 = \frac{a}{\sqrt{V_{np} \cdot \sum \frac{\ell_i}{S_i}}}. \quad (3)$$

При этом импеданс системы определяется только активной составляющей, а сдвиг фаз $j = \arg Z$ между переменным давлением и расходом равен нулю.

Значения амплитуд колебаний давлений и расходов жидкости на входе в полость увеличиваются при повышении добротности гидравлической системы в цикле нагнетания (рис. 6, 7). Добротность стендовой системы D определялась как отношение реактивного сопротивления канала ωL к его активному сопротивлению R :

$$D = \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z} = \frac{\omega L}{R}.$$

Амплитуда колебаний давления в полости определялась по отношению “пикового” давления к давлению насосной станции ($P_{max}/P_{ис}$). А расход жидкости на входе в полость определялся как отношение амплитуды колебаний расхода к среднему расходу насосной станции ($Q_{max}/Q_{ис}$).

Как показали выполненные расчёты и физические эксперименты, значения максимальных расходов жидкости на входе в полость изделия увеличиваются:

- при увеличении добротности системы подачи жидкости;

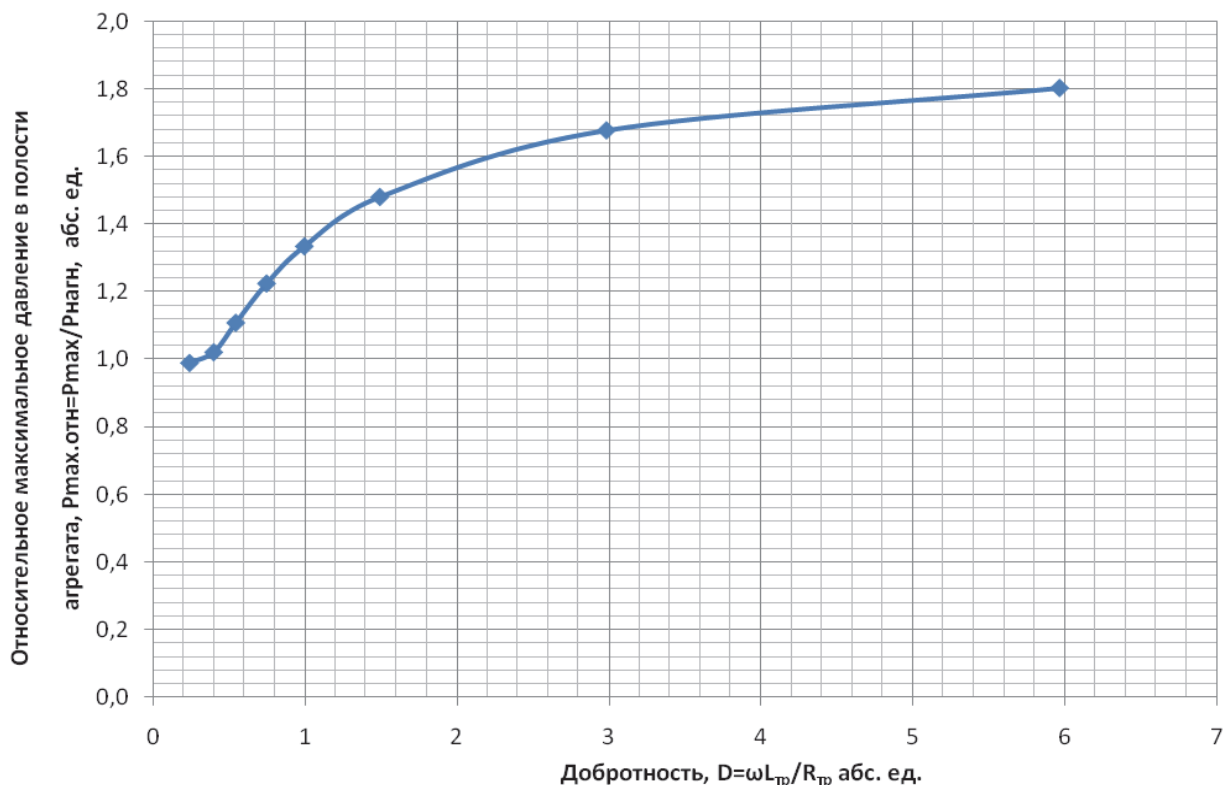


Рис. 6. Влияние добротности стендовой системы на относительное максимальное давление в полости агрегата объёмом $V_{OO}=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

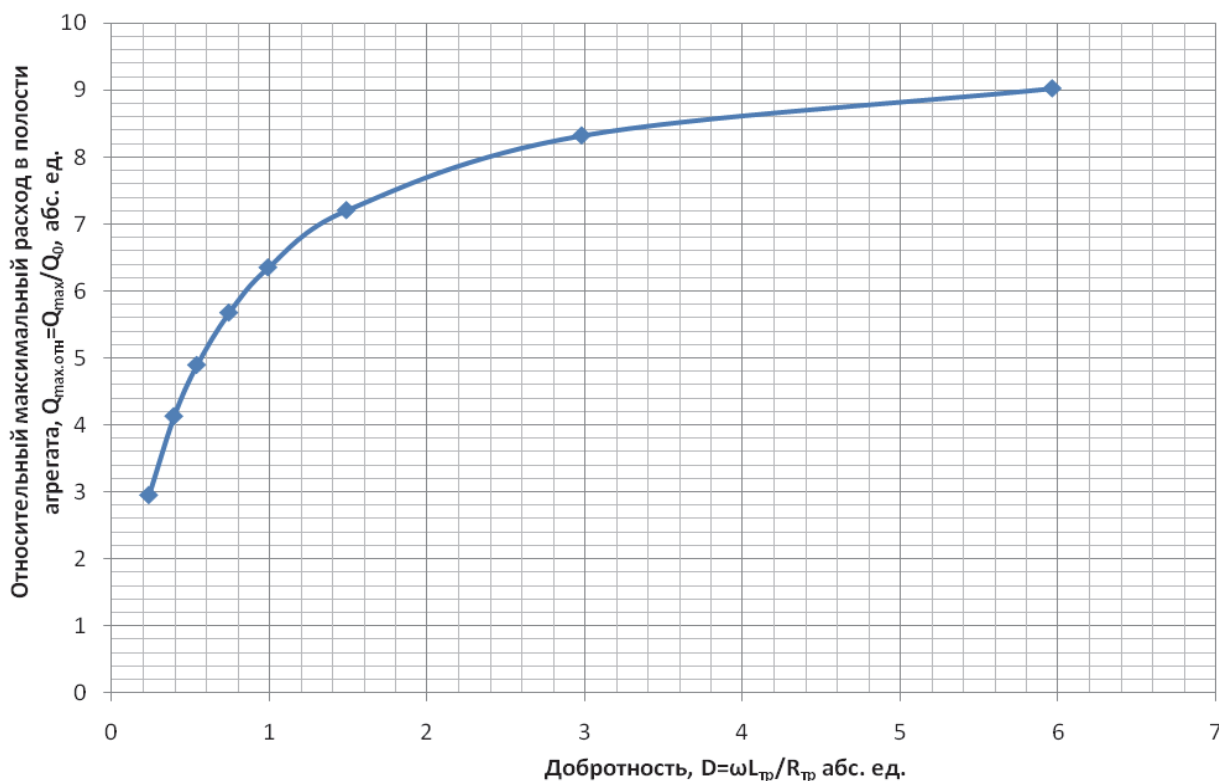


Рис. 7. Влияние добротности стендовой системы на относительный максимальный расход жидкости в полости агрегата объёмом $V_{OO}=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

- при увеличении давления нагнетания насосной станции.

При этом следует учесть, что выполнение данных условий влечёт за собой увеличение значе-

ний максимального давления жидкости в полости изделия, которые должны ограничиваться предельно-допустимыми значениями для конкретного агрегата.

Поэтому последним этапом определения режимов гидродинамической очистки должна быть проверка сохранения прочности агрегата. Объясняется это тем, что развиваемые уровни пульсирующего давления могут превысить допустимые значения обеспечения прочности агрегата.

Несмотря на высокую эффективность удаления частиц, недостатком этого метода является высокое значения колебаний давления в полостях гидроцилиндра.

Таким образом, проблема разработки новых более эффективных гидродинамических технологий очистки внутренних поверхностей агрегатов на основе использования неустановившегося (пульсирующего) течения жидкости является актуальной. Возможное решение данной проблемы необходимо искать в совершенствовании газожидкостной промывки, основанной на использовании низкого коэффициента сжимаемости газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 17216-2001 Промышленная чистота. Классы чистоты жидкости. Введ. 2003-01-01. М.: Изд-во Стандартов, 2002. 8 с.
2. ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. Введ. 1984-01-01. М.: Стандартиформ, 2007. 6 с.
3. *Белянин П.Н., Данилов В.М.* Промышленная чистота машин. М.: Машиностроение, 1982. 224 с.
4. *Санчугов В.И.* Технологические основы динамических испытаний и отработки гидросистем и агрегатов. Учебное пособие. Самара: Самарский научный центр РАН, 2003. 96 с.
5. *Свиридов А.Н.* Оценка эффективности промывки внутренних полостей изделий пульсирующим потоком // Вестник машиностроения. 1981. № 10. С. 33-35.
6. *Тимиркеев Р.Г., Сапожников В.М.* Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 152 с.
7. ГОСТ 31303-2006. Чистота промышленная. Метод очистки гидродинамический газовых и жидкостных систем машин и механизмов от загрязнителей. Введ. 2008-03-01. М.: Стандартиформ, 2007. 18 с.

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR CLEANING THE INTERNAL SURFACE OF CYLINDERS

© 2014 V.I. Sanchugov, V.M. Reshetov, S.V. Turusin

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Presents the basic requirements of industrial purity, an analysis of technologies for cleaning the interior surfaces of the cylinders. Considered are the possibilities and limitations cleaning hydraulic cylinders pulsating flow of liquid.

Key words: cleaning, washing, hydraulic cylinder, hydrodynamic cleaning, pulsating flow.

Valerij Sanchugov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the of Aircraft Maintenance Department.

E-mail: unikon@ssau.ru

Victor Reshetov, Candidate of Technical Sciences, Head of PHS-Laboratory at the Automatic Systems of Power Installations Department. E-mail: vmresh@rambler.ru

Sergey Turusin, Graduate Student.