

УДК 629.7.064

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ И МЕТОДОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ АГРЕГАТОВ ГИДРОТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

© 2013 В. И. Санчугов, В. М. Решетов

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

Представлены результаты исследований гидродинамической очистки гидротопливных агрегатов. Моделирование выполнялось в среде Matlab-Simulink с использованием передаточных функций для пассивных элементов цепи и параметров источника колебаний потока.

Гидроагрегат, агрегат, гидротопливная система, стендовые системы, гидродинамическая очистка, внутренняя поверхность, пульсирующий поток, моделирование, Matlab-SimuLink.

Повышение надёжности и ресурса гидротопливных систем напрямую связано с обеспечением высокого уровня чистоты рабочих жидкостей и внутренних поверхностей всех её элементов и, в первую очередь, гидроагрегатов, имеющих наибольшую грязеёмкость, наличие сложных и тупиковых каналов. Постоянный поиск новых технологий очистки гидроагрегатов позволил выделить в качестве наиболее перспективных гидродинамические методы очистки, основанные на использовании неустановившегося (пульсирующего) течения рабочей жидкости. Однако результаты исследований многочисленных авторов не нашли широкого применения в промышленности. Объясняется это недостаточностью исследования вопросов гидродинамики течения жидкости в очищаемых агрегатах и технологических стендах, стабильности и управляемости параметров колебаний.

Данная работа является продолжением исследований, выполненных авторами настоящей статьи, вошедших в ГОСТ 31303-2006 «Чистота промышленная. Метод очистки гидродинамических газовых и жидкостных механизмов от загрязнителей», введённый в действие с 1 марта 2008 года [1].

Выполненные авторами исследования гидродинамики течения жидкости при очистке агрегатов базировались на импедансном методе описания динамических

процессов течения жидкости [2, 3, 4]. Гидроагрегаты в общем виде рассматривались как совокупность полости определённого объёма V_{oo} и соединительных внутренних и внешних каналов (включая внутренний канал присоединительных штуцеров) длиной l_{mp} и проходным сечением S_{mp} (рис. 1).

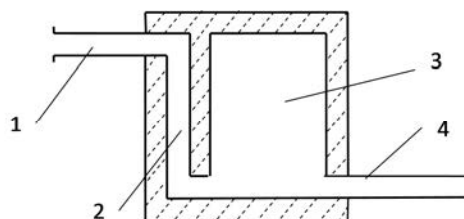


Рис. 1. Обобщённая схема гидравлического агрегата:

1 – внешний соединительный канал; 2 – внутренний канал; 3 – внутренняя полость агрегата; 4 – выходной присоединительный канал

При описании процессов в соединительных каналах принимались во внимание инерция столба жидкости и гидравлическое сопротивление [2]:

$$Z_k = \operatorname{Re} Z_k + j \operatorname{Im} Z_k,$$

где Z_k – импеданс соединительного канала; $\operatorname{Re} Z_k$ – вещественная составляющая импеданса канала; $\operatorname{Im} Z_k$ – мнимая составляющая импеданса канала.

Вещественная часть импеданса $\text{Re} Z_k$ рассчитывалась по известным соотношениям гидравлики с учётом коррективы, учитывающего увеличение гидравлического сопротивления за счёт нестационарности профиля местных скоростей.

Для определения мнимой составляющей импеданса использовалось выражение:

$$\text{Im} Z_k = j\omega r \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{S_i} = j\omega L,$$

где ω – круговая частота; r – плотность жидкости; l_i, S_i – длина и площадь поперечного сечения участка канала; $j = \sqrt{-1}$; L – «индуктивность» канала.

Полости рассматривались как реактивные сопротивления, и их динамические свойства определялись импедансом:

$$Z_n = -j \frac{ra^2}{\omega V_{np}} = -j \frac{1}{\omega C},$$

где a – скорость звука; V_{np} – приведенный объём полости; C – «ёмкость» полости.

При очистке непроточных агрегатов рассматривались два способа возбуждения колебаний:

– гидроударным способом, осуществляемым быстродействующим подключением изделия к гидролиниям нагнетания и слива;

– гармоническим изменением расхода жидкости.

Для очистки непроточных агрегатов разработана схема их очистки при гидроударном возбуждении колебаний, представленная на рис. 2. Принцип действия схемы заключается в том, что при подключении объекта очистки к гидролинии нагнетания в полости объекта очистки возбуждаются затухающие колебания давления и расхода жидкости. При срабатывании генератора колебаний давление в полости падает за счёт слива жидкости в сливную гидролинию.

Для исследования течения жидкости в рассматриваемой системе создана математическая модель. Моделирование выполнялось в среде MatLab Simulink. Структурная схема математической модели представлена на рис. 3. Магистралей высокого и низкого давления, включающие в себя трубопроводы, генератор колебаний и объект очистки моделировались блоками передаточной функции «Transfer Fcn1» и «Transfer Fcn2». Это объясняется тем, что геометрия этих магистралей различна, как и различно их назначение. Передаточная функция этих блоков описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$LC \frac{d^2 P_{\text{вых}}}{dt^2} + RC \left(\frac{dP_{\text{вых}}}{dt} \right) + P_{\text{вых}} = P_{\text{ex}}.$$

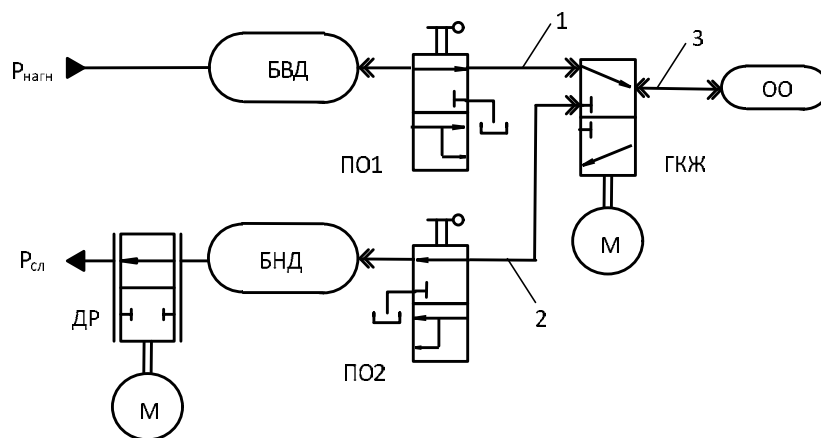


Рис. 2. Схема возбуждения гидроударных колебаний при очистке непроточных агрегатов: БВД, БНД – баллон высокого и низкого давления; ДР – регулируемый дроссель; ГКЖ – генератор колебаний жидкости; М – привод; ПО1, ПО2 – пробойники жидкости; ОО – объект очистки; 1, 2, 3 – соединительные магистрали

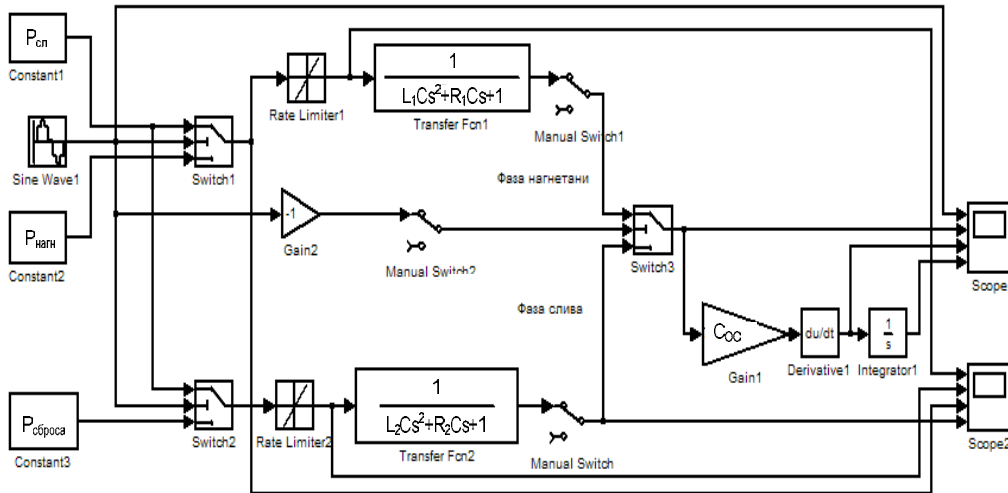


Рис. 3. Модель исследования колебаний жидкости при очистке непроточных агрегатов

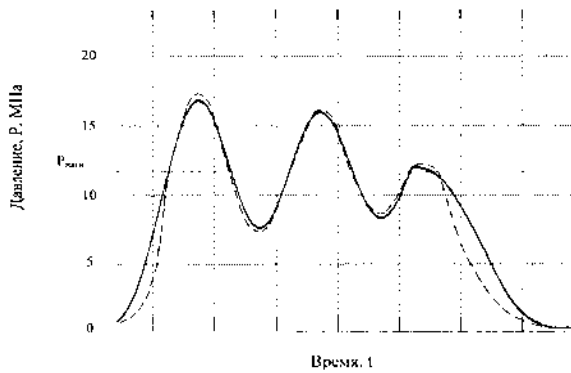


Рис. 4. Сравнительные осциллограммы на частоте 65.3 Гц, полученные по расчётной модели (—) и в результате физических экспериментов (---) при $V_{00}=0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; трубопровод (1 и 3) $d_y=12 \text{ мм}$, $\ell_p=0,19 \text{ м}$; $P_{нагн}=12 \text{ МПа}$; $P_{сл}=0,5 \text{ МПа}$

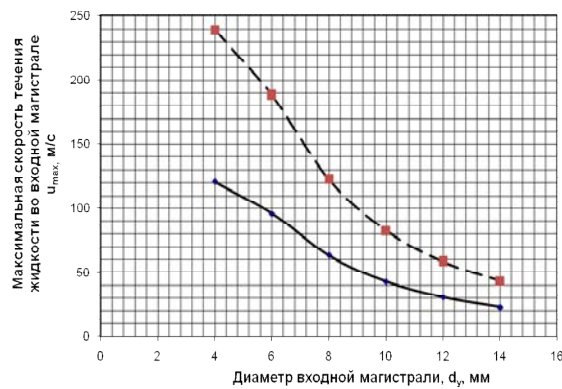


Рис. 5. Достижимые скорости течения жидкости на входе в объект очистки ($V_n=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $f_{ци}=50 \text{ Гц}$) при $P_{нагн}=10 \text{ МПа}$ (—) и $P_{нагн}=20 \text{ МПа}$ (---)

Проверка адекватности математической модели осуществлялась сравнением результатов расчёта по представленной модели с результатами физических экспериментов, выполненных ранее при создании методов ускоренных эквивалентных испытаний агрегатов (рис. 4). Проверка подтвердила удовлетворительную сходимость результатов исследований как по частоте, так и по амплитуде возбуждаемых колебаний.

Результаты выполненных исследований показали следующее:

1. Максимальные скорости течения жидкости на входе в очищаемый агрегат могут достигать до 250 м/с (рис. 5).

2. Подключение гидролинии слива должно осуществляться в момент достижения первого максимума давления в полости очищаемого агрегата.

3. Переключение гидролиний нагнетания и слива целесообразно производить в моменты неподвижной жидкости в магистралях стенда, то есть при достижении максимальных или минимальных значений давления. Фаза нагнетания должна начинаться после стабилизации давления на уровне давления баллона низкого давления и заканчиваться в момент времени, при котором $P = P_{max}$.

4. Значения максимальных давлений и расходов жидкости на входе в полость увеличиваются при повышении добротности

сти гидравлической системы в цикле нагнетания. Добротность магистрали нагнетания должна быть максимальной, а добротность магистрали слива должна обеспечивать бескавитационный процесс сброса давления жидкости.

5. Соотношение объёма вытесняемой из полости агрегата жидкости $\Delta V_{\text{полости}}$ и объёма соединительного канала $V_{\text{соед.канала}}$ от полости до генератора колебаний определяет эффективность выноса частиц загрязнений из условия:

$$\Delta V_{\text{полости}} > V_{\text{соед.канала}} \cdot$$

На основе выполненных исследований разработаны:

–методика оценки возможности применения разрабатываемой технологии по условию выноса загрязнений из полости агрегата;

–методика расчёта условий максимального отрыва частиц загрязнений со

стенок очищаемого агрегата с учётом сохранения прочности агрегата.

Первая методика заключается в расчётном определении порций объёма жидкости, вытекающих из полости агрегата, и сравнении их с минимальным объёмом соединительной магистрали между генератором колебаний и полостью объекта очистки, обеспечивающим вынос частиц загрязнений.

Вторая методика заключается в расчёте геометрических параметров стендовой системы и параметров работы генератора колебаний, обеспечивающих максимальные значения расхода жидкости в полости агрегата и ограниченных условиями сохранения прочности агрегата.

Для очистки непроточных агрегатов на режимах вынужденных периодических колебаний разработана схема с параллельным размещением дроссельного генератора колебаний на входе в объект очистки (рис. 6).

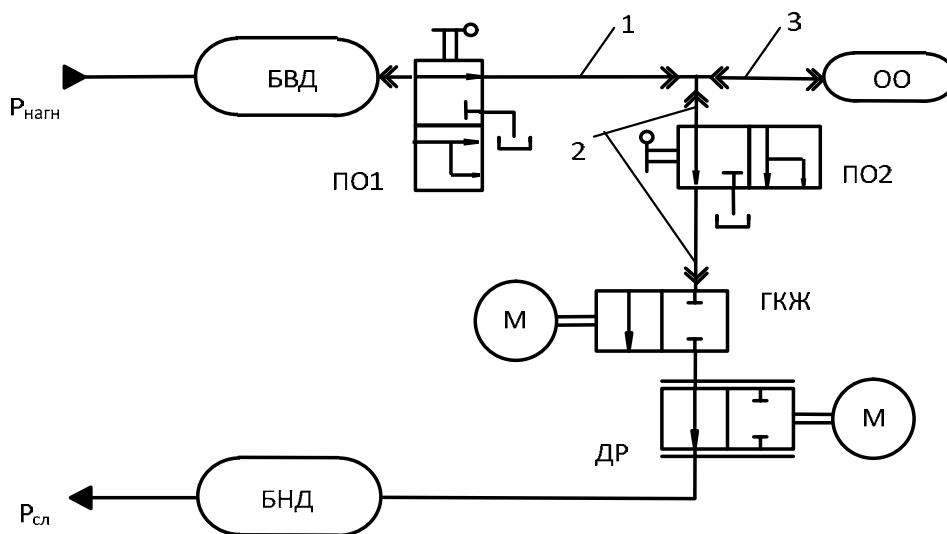


Рис. 6. Схема очистки непроточных агрегатов с параллельным подключением ГКЖ на сливе жидкости

Пример математической модели течения жидкости представлен на рис. 7. Параметры стендовой системы:

–давление нагнетания $P_{\text{нагн}}=5$ МПа;
–производительность генератора колебаний $A_{Q0}=Q_0=1 \cdot 10^{-3}$ м³/с;

–объём полости объекта очистки – $1 \cdot 10^{-3}$ м³;

–трубопровод 1 – внутренний диаметр $d_y=10$ мм, длина $\ell=0,2$ м;

–трубопровод 3 – внутренний диаметр $d_y=10$ мм, длина $\ell=0,3$ м.

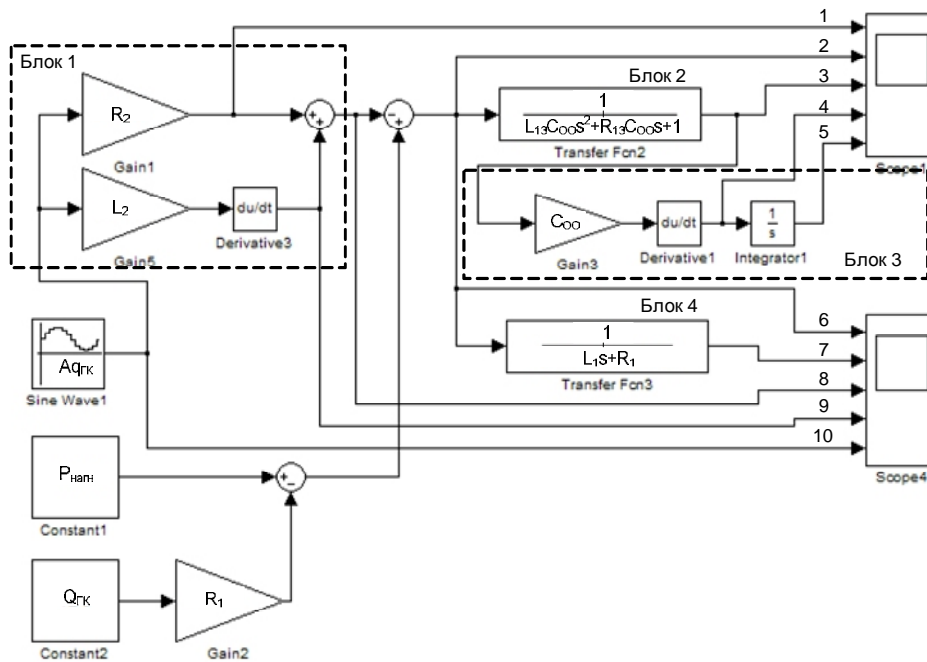


Рис. 7. Модель исследования схемы очистки при возбуждении вынужденных колебаний жидкости

Модель позволяет:

- определить параметры пульсирующего потока жидкости (давление и расходы) в различных сечениях гидравлической системы;

- исследовать влияние геометрических параметров трубопроводов стендовой системы на режимы течения жидкости в полости объекта очистки;

- оценить требования и размещение агрегатов стендовой системы и область реализации технологии пульсирующей очистки.

Результаты расчётов выводятся на осциллографы в виде синусоидальных сигналов изменения давления и расхода жидкости или представляются в графической форме.

Исследования на модели показали следующее.

1. Достигаемые расходы и скорости течения жидкости в несколько раз превосходят значения, достигаемые при стационарной очистке.

2. Ограничения применимости технологии по выносу частиц загрязнений и сохранению прочности агрегата носят такой же характер, как и при использовании

гидроударного способа возбуждения колебаний, изложенного ранее.

Для очистки проточных агрегатов разработана схема, представленная на рис.8. Особенностью схемы является размещение на выходе объекта очистки блока граничных условий, выполненного в виде соединительного канала и полости. Сюда же в параллельную магистраль подключается дроссель постоянного расхода и пробоотборник.

Преимуществами данной схемы являются:

- работа генератора колебаний в потоке чистой жидкости;

- снижение уровня колебаний давления жидкости в объекте очистки.

Как и для схем очистки непроточных агрегатов, разработана математическая модель рассматриваемой стендовой системы, выполнены необходимые расчёты, показавшие следующее:

- очистка проточных агрегатов реализуется для любых типоразмеров агрегатов;

- пульсирующую очистку целесообразно проводить на частотах колебаний, близких к собственной частоте блока граничных условий.

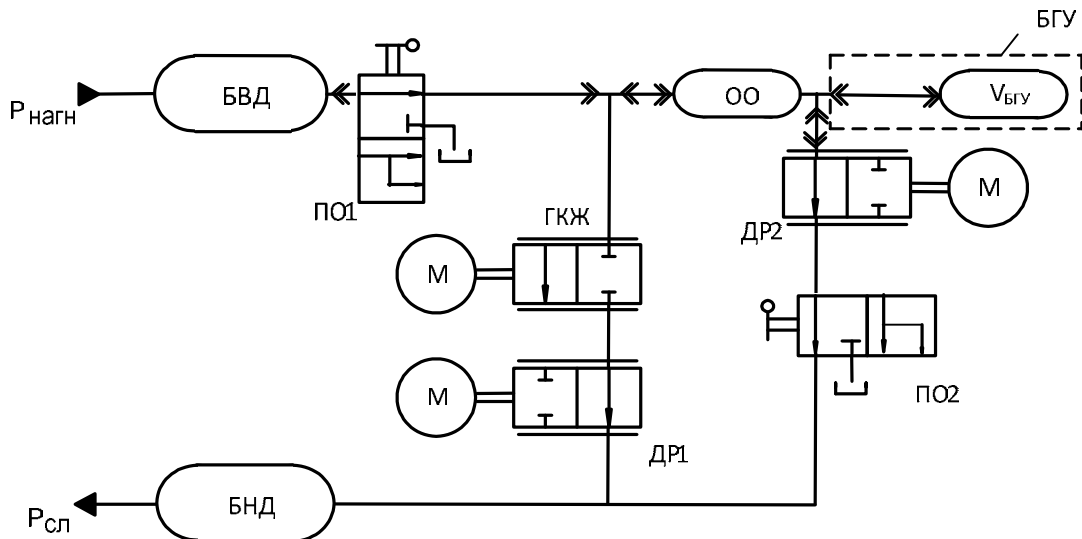


Рис. 8. Схема очистки проточных агрегатов с параллельным подключением ГКЖ на входе и блоком граничных условий (БГУ) на выходе из полости агрегата

Основной особенностью гидроцилиндров как объектов очистки является изменение внутреннего объема полостей при срабатывании. При этом, в отличие от моделей агрегатов с фиксированным объемом полостей, рассмотренных ранее, импеданс полости изменяется в весьма значительных диапазонах. Это приводит, с одной стороны, к изменению собственной частоты стеновой системы «подводящий трубопровод - полость гидроцилиндра» и, с другой стороны, к непрерывному изменению амплитуды колебаний давления в полости.

С учётом этих особенностей предложены два метода очистки гидроцилиндров:

–отрыв частиц загрязнений пульсирующим потоком при неизменном положении штока и максимальном объеме очищаемой полости. Затем после выключения генератора колебаний выполняют срабатывание гидроцилиндра для удаления оторванных частиц загрязнений из полости;

–отрыв частиц загрязнений при увеличении объема очищаемой полости с последующей перекладкой штока цилиндра вблизи среднего положения и при непрерывно работающем генераторе колебаний.

Для обоих методов разработаны схемы подключения генераторов колебаний гидроударного возбуждения и возбуждения вынужденного периодического движения жидкости.

В качестве примера на рис. 9 представлена схема очистки гидроцилиндра с использованием вынужденных колебаний жидкости с двумя генераторами колебаний.

Таким образом, в результате проведенных исследований гидродинамической очистки внутренних полостей гидроагрегатов и гидроцилиндров подтверждена её высокая эффективность, разработаны расчётные модели и даны рекомендации по проектированию стендового оборудования и совершенствованию технологии очистки.

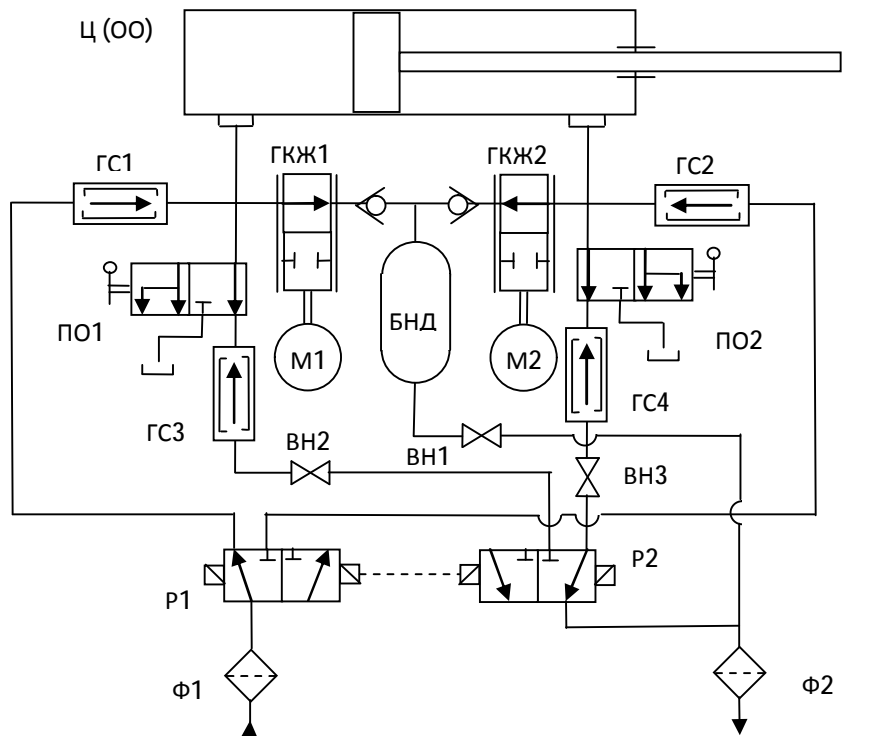


Рис. 9. Схема очистки гидроцилиндров с использованием вынужденных колебаний с двумя генераторами колебаний жидкости:
 БНД – баллон низкого давления; ВН – вентиль; ГКЖ – генератор колебаний жидкости;
 ГС – гаситель колебаний; М – привод ГКЖ (мотор); ПО – пробоотборник;
 Р – распределитель потока; Ф – фильтр; Ц (ОО) – цилиндр (объект очистки)

Библиографический список

- ГОСТ 31303-2006. Чистота промышленная. Метод очистки гидродинамической газовых и жидкостных систем машин и механизмов от загрязнителей. [Текст]. – Введ. 2008-03-01. – М.: Стандартиформ, 2007. – 18 с.
- Шорин, В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах [Текст] / В.П. Шорин. – М.: Машиностроение, 1980. – 156 с.
- Шахматов, Е.В. Виброакустиче-

ская модель прямолинейного неоднородного трубопровода при его силовом возбуждении пульсациями рабочей жидкости [Текст] / Е.В. Шахматов, А.Б. Прокофьев // Изв. Самар. науч. центра РАН. – Самара, 2000. – Т. 2. – № 1. – С. 135-140.

- Санчугов, В.И. Технологические основы динамических испытаний и отработки гидросистем и агрегатов [Текст]: учеб. пособие / В.И. Санчугов. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2003. – 96 с.

ANALYSIS OF SCHEMES AND METHODS OF HYDRODYNAMIC CLEANING OF HYDRO-FUEL SYSTEM UNITS

© 2013 V. I. Sanchugov, V. M. Reshetov

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

The paper presents the results of research of hydrodynamic cleaning of hydro-fuel units. The modeling was executed in Matlab-Simulink using transfer functions for the circuit passive elements and the parameters of the flow oscillation source.

Hydraulic unit, unit, hydro-fuel system, stand system, hydrodynamic cleaning, inside surface, oscillating flow, model, Matlab-SimuLink.

Информация об авторах

Санчугов Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: unikon@ssau.ru. Область научных интересов: гидropневмоавтоматика, испытания и эксплуатация пневмогидросистем.

Решетов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, заведующий учебно-научной лабораторией кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vmresh@rambler.ru. Область научных интересов: динамика гидравлических и пневматических систем, испытания и эксплуатация, промышленная чистота пневмогидросистем.

Sanchugov Valery Ivanovich, doctor of technical science, professor of the department of aircraft maintenance, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: unikon@ssau.ru. Area of research: hydraulic and pneumatic control, tests and operation of hydropneumatic systems.

Reshetov Victor Mikhaylovich, candidate of technical science, head of laboratory, the department of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: vmresh@rambler.ru. Area of research: dynamics of hydraulic and pneumatic systems, tests and operation, industrial purity of hydropneumatic systems.