

УДК 629.73.063

ОЧИСТКА ТРУБОПРОВОДОВ, СМОНТИРОВАННЫХ НА БОРТУ ИЗДЕЛИЯ, ПУЛЬСИРУЮЩИМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

© 2017 В.И. Санчугов¹, В.М. Решетов¹, С.С. Мещеряков²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

² Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 20.12.2017

В данной статье рассматриваются вопросы применения пульсирующих потоков жидкости для повышения эффективности процессов очистки внутренней поверхности трубопроводов. 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. Для обеспечения эффективного удаления частиц загрязнений необходимо обеспечить равномерность амплитуд колебаний давления по длине очищаемого трубопровода. Это возможно только при реализации в очищаемом трубопроводе режима бегущей волны. Для реализации процесса очистки протяженных трубопроводов путем создания колебаний расхода моющей жидкости в режиме бегущих волн были разработаны, изготовлены и внедрены на ряде предприятий авиационной и судостроительной промышленности стенды и технологии гидродинамической очистки. В результате исследований созданы и внедрены в производство стенды гидродинамической очистки трубопроводов, позволяющие в 2...2,5 раза сократить время очистки и в 2...3 раза повысить качество процессов при достижении 5...6 класса чистоты по ГОСТ 17216-2001.

Ключевые слова: очистка, промывка, пульсирующий поток, трубопровод, режим бегущей волны, эффективность очистки.

Повышение надёжности и ресурса гидротехнических систем напрямую связано с обеспечением высокого уровня чистоты рабочих жидкостей и внутренних поверхностей всех её элементов. Постоянный поиск новых технологий очистки позволили выделить в качестве наиболее перспективных гидродинамические методы очистки, основанные на использовании неустановившегося (пульсирующего) течения рабочей жидкости. Характерной и основной особенностью очистки изделий пульсирующим однофазным потоком является наличие существенных периодических составляющих давления и расхода моющей жидкости, в значительной мере определяющих качество и длительность технологического процесса.

Традиционно очистка внутренней поверхности трубопроводов и гидроагрегатов стационарным потоком рабочей жидкости заключается в следующем (рис. 1):

- подача рабочей жидкости с рабочим давлением от насосной станции к технологическому стенду очистки;

Санчугов Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок. E-mail: sanchugov.vi@yandex.ru

Решетов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией пневмогидросистем кафедры автоматических систем энергетических установок. E-mail: vmtresh@rambler.ru

Мещеряков Сергей Сократович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
E-mail: ssm60@inbox.ru

- 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 трубопровода или полости агрегата.

С физической точки зрения процесс очистки состоит из следующих составляющих:

- отрыв частиц загрязнений от стенок внутренней поверхности агрегатов;

- взвешивание и транспортировка частиц загрязнений вместе с жидкостью за пределы агрегата;

- очистка рабочей жидкости на выходе объекта очистки от частиц загрязнений.

Обычно очистка смонтированных трубопроводных коммуникаций гидравлических систем проводится на первом этапе окончательной сборки изделий. При этом гидросистема расчленяется на ряд участков, из которых исключаются агрегаты, а трубопроводы состыковываются в ряд закольцовок. Эти закольцовки последовательно подвергаются очистке, после чего система собирается окончательно.

Основной эффект гидродинамических (пульсационных) технологий при очистке трубопроводов заключается в перестроении профиля течения жидкости, при котором максимум

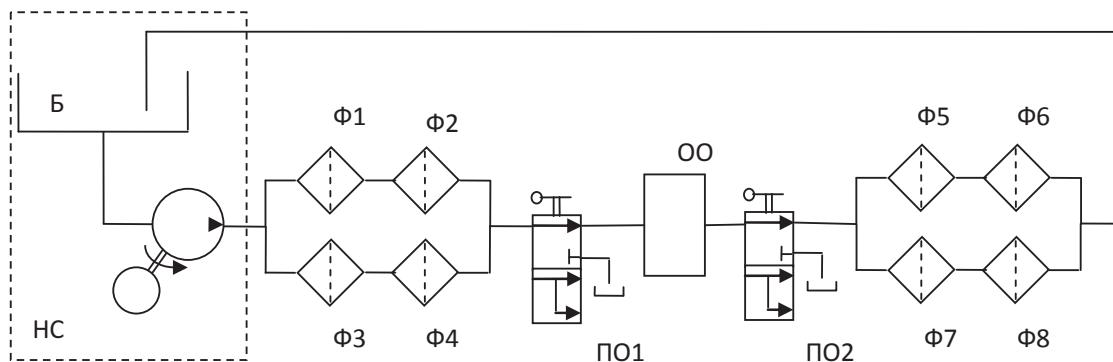


Рис. 1. Структурная схема очистки прокачкой жидкости:

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

скорости потока смещается к стенке трубопровода, чем и обусловлен рост касательных напряжений жидкости о стенку трубопровода и повышение эффективности отрыва частиц загрязнений (рис. 2).

Кроме того, возникающая при колебаниях потока жидкости вибрация трубопровода способствует отрыву частиц загрязнений от стенки за счет наложения на них виброускорений. Отрыву частиц способствует также импульсное (противоположных знаков) силовое воздействие жидкости и колебания поперечного сечения трубопровода (радиальная вибрация).

При разработке технологического процесса очистки в зависимости от диаметра очищаемых трубопроводов определяются стационарные составляющие давления и расхода жидкости, частота и амплитуды колебаний давления и расхода жидкости и допустимое время очистки.

В основу расчета положены следующие допущения:

- необходимым условием эффективной очистки является наличие в очищаемой системе стационарной составляющей скорости жидкости v_{tp} , гарантирующей транспортировку оторванных от стенок частиц загрязнений;

- достаточным условием отрыва частиц от стенок трубопроводов является создание динамических составляющих частоты и амплитуды колебаний расхода жидкости;

- сохранение условий прочности трубопроводов обеспечивается ограничением продолжительности процесса очистки.

Расчет максимальных длин очищаемых магистралей заданного диаметра из условия транспортировки частиц заключался в обеспечении необходимой скорости течения, допустимого перепада давления и выполнялся по известным формулам гидравлики. При определении скорости потока использовались результаты исследований В.М. Сапожникова [1], который установил, что скорость потока $v_{tp} = 10 \text{ м/с}$ является достаточной для выноса частиц диаметром более 10 мкм.

Расчет динамической составляющей потока жидкости заключался в определении частоты колебаний потока при двукратном затухании колебаний от начала до конца трубопроводов. Для расчёта распространения колебаний использовалась математическая модель однородной линии, представленная в работе Б.Ф. Гликмана [2]. В качестве иллюстрации на рис. 3 представлено распространение относительных амплитуд колебаний расхода в промываемой цепи диаметром 14 мм, длиной 170 м, при использовании масла АМГ-10 в качестве рабочей жидкости на частоте колебаний 40 Гц. Значения импеданса стеновой системы, присоединённой на конце очищаемой магистрали учитывалось величиной относительного импеданса трубопровода:

$$\bar{Z} = Z_b / Z_2 ,$$

где Z_b – волновое сопротивление трубопровода;

Z_2 – импеданс стеновой системы на выходе очищаемого трубопровода.

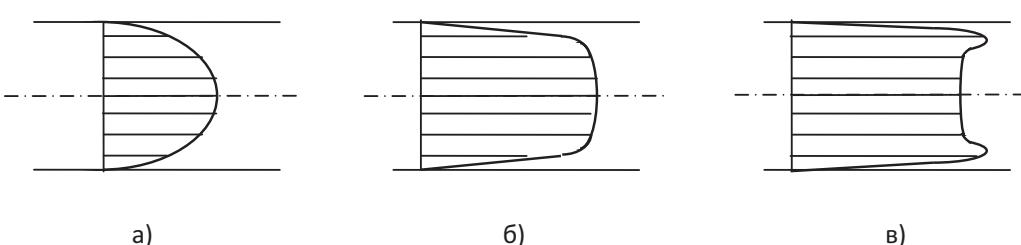


Рис. 2. Эпюры скоростей жидкости при различных режимах течения жидкости

а) при ламинарном потоке; б) при турбулентном потоке; в) при пульсирующем потоке жидкости

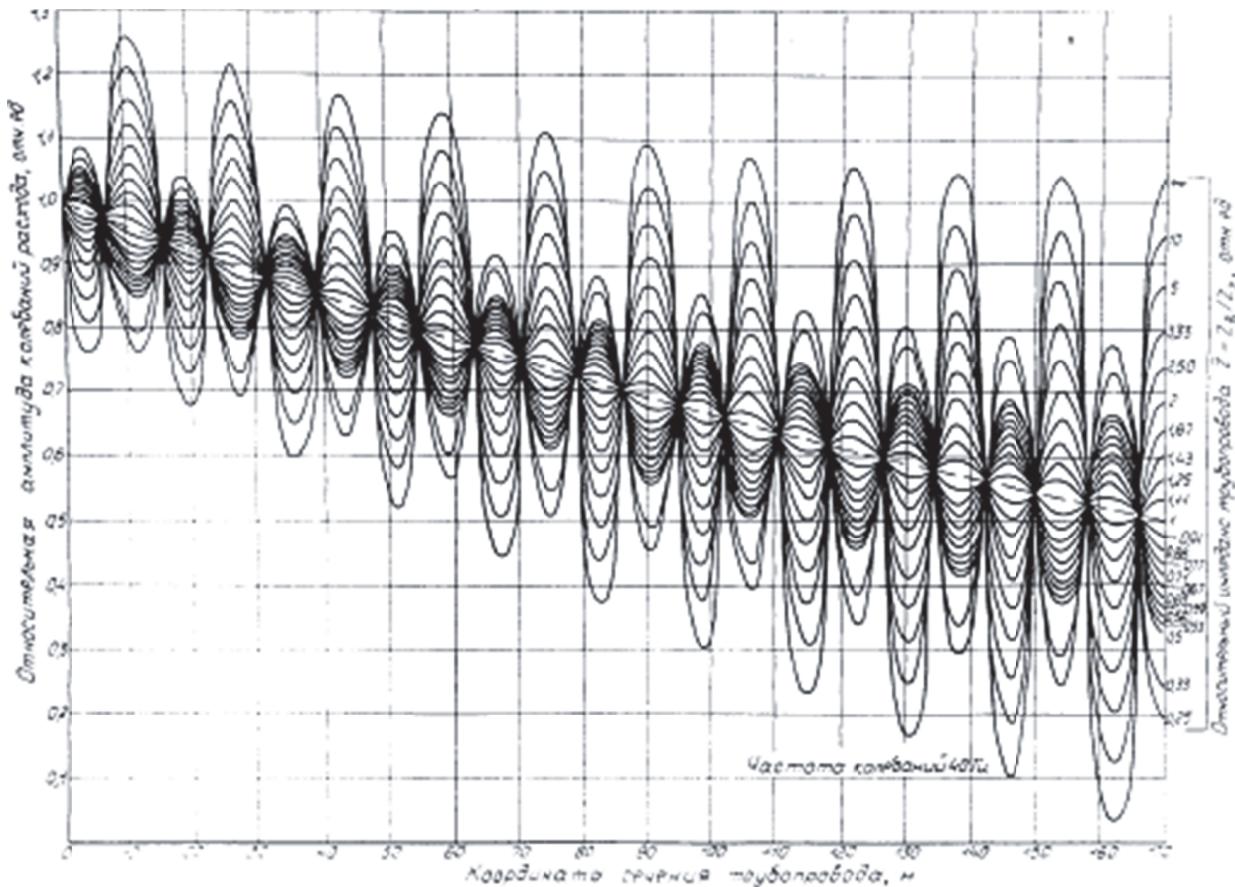


Рис. 3. Распределение амплитуд колебаний расхода в промываемой цепи
($dy=14\text{мм}$, $L=170\text{м}$, АМГ-10)

Оценка предельно допустимого уровня колебаний потока жидкости обусловлена возможновением дополнительных динамических нагрузок на элементы очищаемой системы. Предел повышения амплитуд колебаний потока устанавливался с учётом допустимого накопления усталостных повреждений в процессе очистки. Эти повреждения (E) определялись с учётом частоты колебаний $f_{\text{оч}}$, времени их воздействия (т.е. времени очистки $T_{\text{оч}}$) и эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{аэкв}}$, развивающегося в материале трубопровода:

$$E = \sigma_{\text{аэкв}} \cdot T_{\text{оч}} \cdot f_{\text{оч}} .$$

Выполненные теоретический анализ и тензометрирование трубопроводов на изделиях авиационной техники показали следующее:

Наиболее опасным, определяющим прочностные характеристики трубопроводов при очистке, являются входные участки, где величины статического и динамического давления максимальны;

Очистка линий на частоте 40...60 Гц с амплитудой 1,5...2,0 МПа и при пиковых давлениях, не превышающих рабочие значения, не представляет опасности. Очистка в течение 15...20 минут гарантирует 3,5...4 кратный запас усталостной прочности трубопроводов.

Предложенный подход к определению параметров потока жидкости реализован в следующем алгоритме:

$$L_{\max} \Big|_{\begin{subarray}{l} d=\text{Const} \\ p=10 \text{ МПа} \\ \Delta P=P_{\text{раб}} \end{subarray}} \rightarrow f_{\text{оч}} \Big|_{A_{P_{\text{раб}}} = 0,5 A_{P_{\text{раб}}}} \rightarrow A_{Q_{\text{оч}}} \Big|_{A_{P_{\text{раб}}}} \rightarrow T_{\text{оч,пред}} \Big|_{E \leq E_{\text{дон}}}$$

На рис. 4 представлена графическая иллюстрация алгоритма расчёта параметров потока жидкости при гидродинамической очистке с учётом появления механического резонанса трубопровода между элементами крепления его к фюзеляжу.

Для обеспечения эффективного удаления частиц загрязнений необходимо обеспечить равномерность амплитуд колебаний давления по длине очищаемого трубопровода. Это возможно только при реализации в очищаемом трубопроводе режима бегущей волны.

Для реализации процесса очистки протяженных трубопроводов путем создания колебаний расхода моющей жидкости в режиме бегущих волн были разработаны, изготовлены и внедрены на ряде предприятий авиационной и судостроительной промышленности стенды и технологии гидродинамической очистки [3, 5, 6]. В качестве примера на рис. 5 представлена принципиальная схема СПД 08.000.000, а на рис. 6 – внешний вид стендов СПД 08.000.000 и СПД 05.000.000.

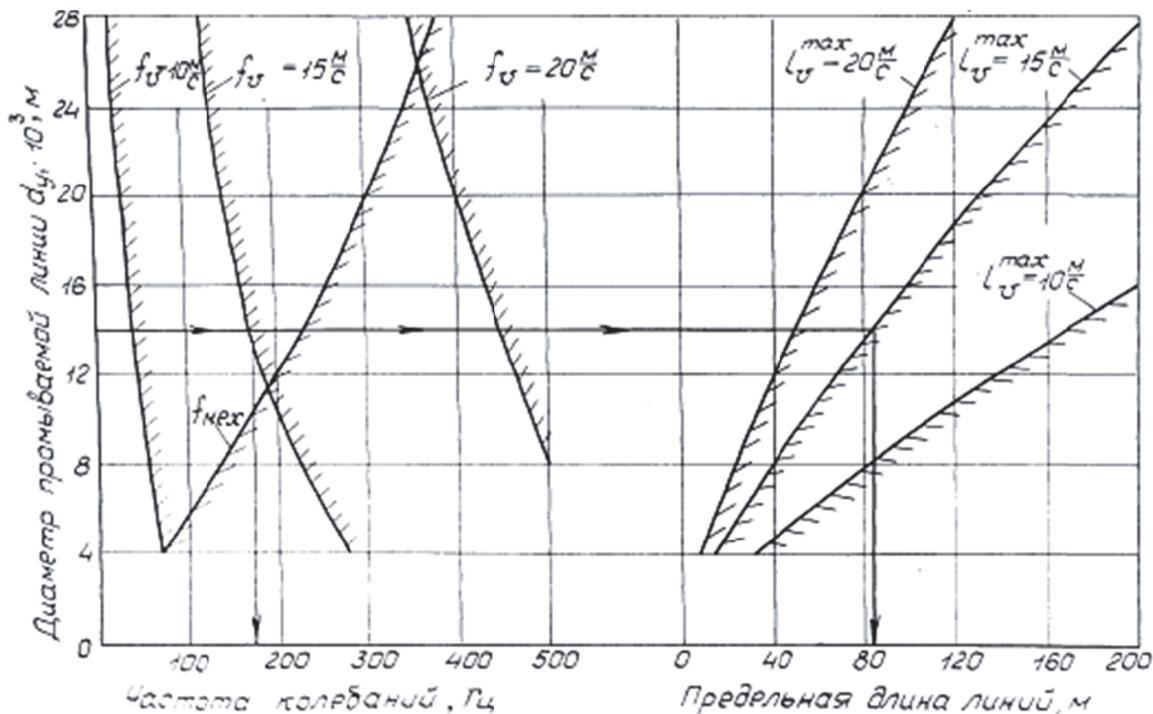


Рис. 4. Область допустимых параметров очистки

Стенд предназначен для очистки трубопроводных магистралей диаметром от 6 до 65 мм. Блок акустической развязки БАР1 по линии подачи жидкости, выполненный в виде емкости Б1 и трех участков трубопроводов, открываемых вентилями ВН3...ВН5, в зависимости от диаметра очищаемых магистралей, обеспечивает заданный модуль входного импеданса со стороны генератора колебаний.

Соответственно блок граничных условий БГУ выполнен в виде трех согласующих устройств ГП1...ГП3, рассчитанных на очистку магистралей различных диаметров.

Стенд обеспечивает очистку магистралей до 6-го класса по ГОСТ 17216-2001 [4] за время, не превышающее 15 минут.

Динамика изменения чистоты жидкости при гидродинамической (пульсирующей) очистки и

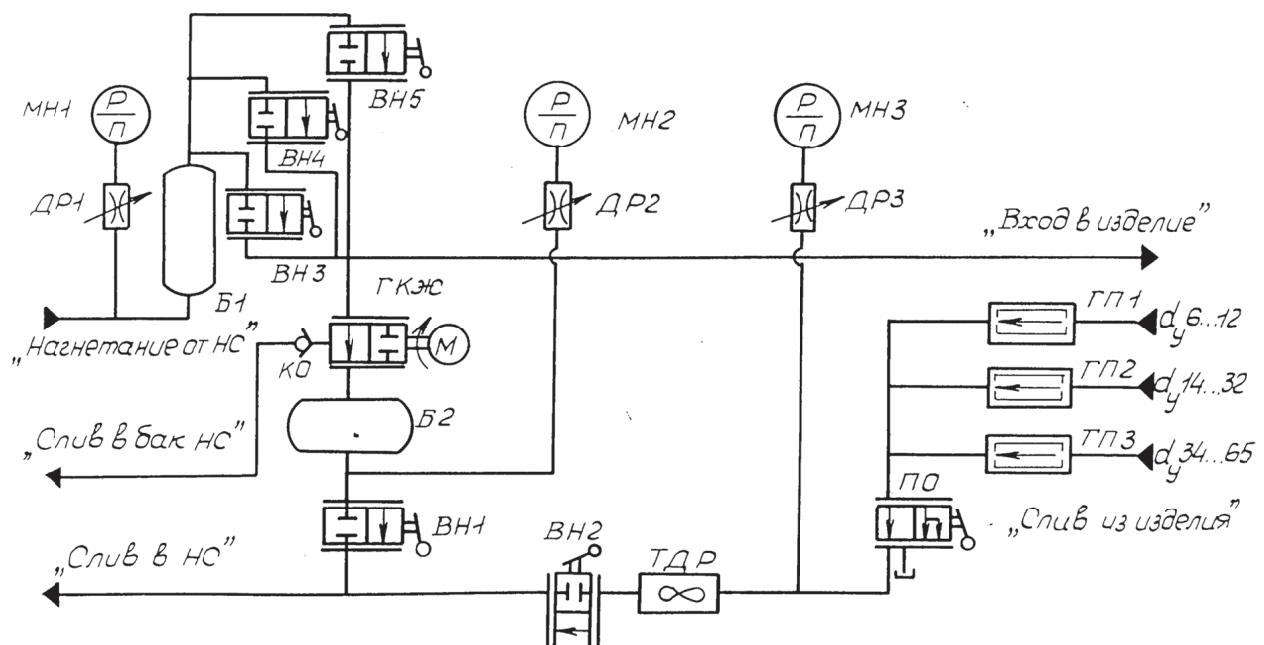
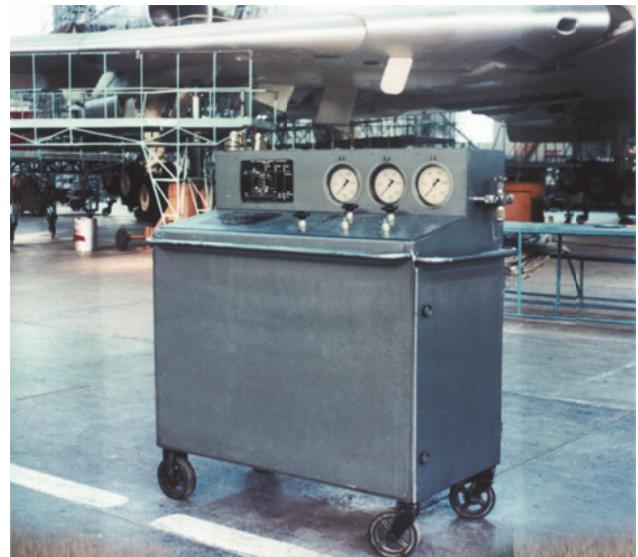


Рис. 5. Принципиальная гидравлическая схема стенда СПД 08.000.000:
Б1 – баллон высокого давления; Б2 – баллон низкого давления; ВН1...ВН5 – вентили;
ГКЖ – генератор колебаний жидкости; ГП1...ГП2 - согласующие устройства; ДР1...ДР3 – дроссели;
МН1...МН3 – манометры; ПО – пробоотборник; ТДР – датчик расхода жидкости



а)
б)
Рис. 6. Стенды СПД-08.000.000 (а) и СПД-05.000.000 (б)

стационарной очистки представлена на рис. 7. Результаты определялись в виде разности количества выносимых из системы частиц и ко-

личества частиц, поступающих в систему с потоком рабочей жидкости от насосной станции. Отрицательное количество выносимых частиц

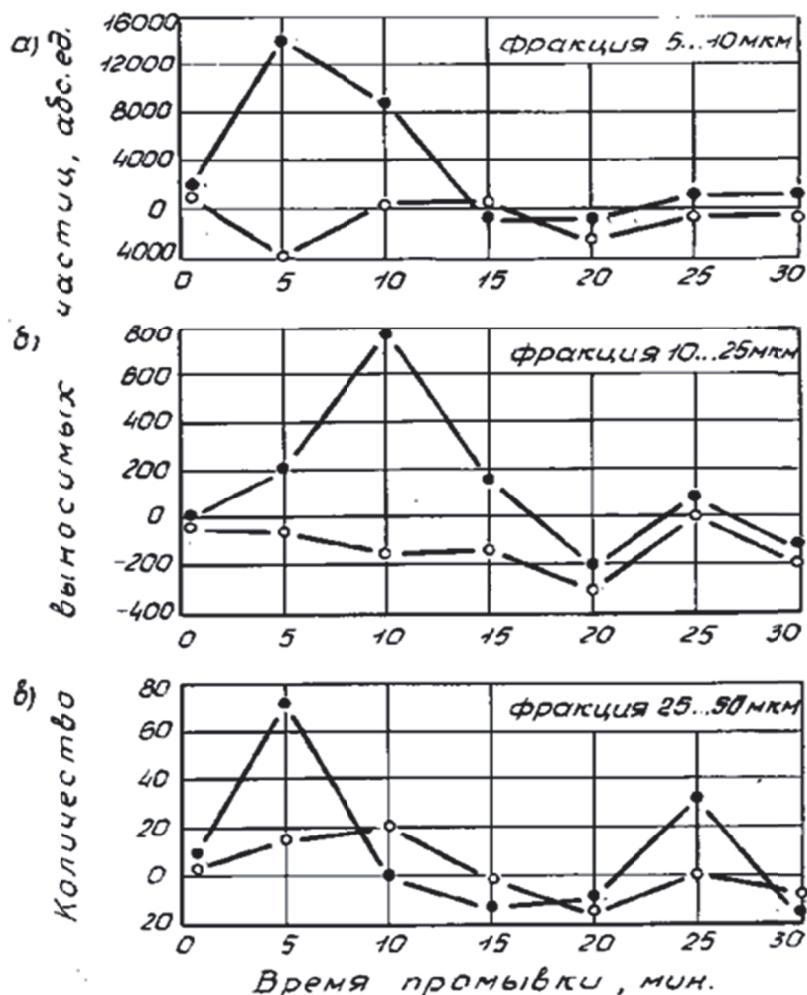


Рис. 7. Очистка линии пульсирующим и стационарным потоками:
 • – гидродинамическая очистка;
 ○ – очистка стационарным потоком жидкости

при очистке стационарным потоком физически означает, что вместо очистки системы наблюдался процесс добавочного поступления частиц загрязнений в очищаемый трубопровод и осаждение их на стенках магистрали. Наибольший эффект гидродинамической очистки наблюдался для минимальных размерных фракций 5...10 мкм и 10...25 мкм в первые минуты технологического процесса.

Таким образом, в результате исследований созданы и внедрены в производство стенды гидродинамической очистки магистралей, позволяющие в 2...2,5 раза сократить время очистки и в 2...3 раза повысить качество процессов при достижении 5...6 класса чистоты по ГОСТ 17216-2001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников В.М. Монтаж и испытание гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.
2. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука, 1986. 368 с.
3. ГОСТ 31303-2006. Чистота промышленная. Метод очистки гидродинамический газовых и жидкостных систем машин и механизмов от загрязнителей. Введ. 2008-03-01. М.: Стандартинформ, 2007. 18 с.
4. ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. Введ. 2003-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с.
5. Санчугов, В.И., Решетов В.М. Снижение загрязнённости агрегатов гидропривода машин и механизмов на основе гидродинамической очистки // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 6. С.264-268.
6. Sanchugov, V.I., Reshetov V.M. Special features of internal surfaces cleaning processes control in pipelines and units of hydro-fuel systems // Procedia Engineering, 2017. Vol. 176. PP. 618-627.

CLEANING OF THE PIPELINES MOUNTED ONBOARD THE PRODUCT, THE PULSING LIQUID STREAM

© 2017 V.I. Sanchugov, V.M. Reshetov, S.S. Meshcheryakov

¹Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

²Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

In this article questions of application of the pulsating liquid flows for increase in efficiency of processes of cleaning of an internal surface of pipelines are considered. The main advantage of hydrodynamic (pulsation) technologies when cleaning pipelines consists in evolution of a profile of a current of liquid in case of which the maximum of flow rate displaces to a pipeline wall, than and growth of tangent tension of liquid about a wall of the pipeline and increase in efficiency of a lift-off of particles of pollution is caused. For support of effective deleting particles of pollution it is necessary to provide uniformity of vibration amplitudes of pressure on length of the cleaned pipeline. It is possible only in case of implementation in the cleaned pipeline of the mode of traveling wave. For implementation of process of cleaning of extensive pipelines by creation of oscillations of the expenditure of the washing liquid in the mode of traveling waves benches and technologies of hydrodynamic cleaning were developed, made and implemented on a row of the enterprises of the aviation and ship-building industry. As a result of researches the benches of hydrodynamic cleaning of pipelines allowing in 2 ... 2,5 times are created and implemented in production to reduce time of cleaning and in 2 ... 3 times to increase quality of processes in case of achievement 5 ... 6th class of purity in accordance with GOST 17216-2001.

Keywords: cleaning, washing, the pulsing stream, the pipeline, the mode of the running wave, efficiency of cleaning.

Valery Sanchugov, Doctor of Technics, Professor at the Automatic Systems of Power Plants Department.

E-mail: sanchugov.vi@yandex.ru

Viktor Reshetov, Candidate of Technics, Head of the Laboratory of Hydraulic and Pneumatic Systems at the Automatic Systems of Power Plants Department.

E-mail: vmresh@rambler.ru

Sergey Meshcheryakov, Candidate of Technics, Senior Research Fellow. E-mail: ssm60@inbox.ru