

## **Гидроимпульсная очистка и контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов**

**Кровяков В.Б.\***, **Романов А.А.\*\***, **Коротеев А.Ю.\*\*\***, **Ялпаев А.А.\*\*\*\***

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина  
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

*\*e-mail: vlkrov@rambler.ru*

*\*\*e-mail: qutbeast@mail.ru*

*\*\*\*e-mail: aleksandr.koroteev@mail.ru*

*\*\*\*\*e-mail: antonyalpaev@yandex.ru*

### **Аннотация**

В работе представлены проблемы и направления совершенствования технологических процессов очистки рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов, разработанная высокоэффективная технология гидроимпульсной очистки. Дан анализ применяемых и перспективных методов и средств контроля уровня загрязненности рабочих полостей, определены направления повышения объективности контроля и предложены пути их решения.

**Ключевые слова:** промышленная чистота, очистка, промывка, жидкостная система, агрегат, рабочая полость, контроль.

## **Введение**

Решение проблем обеспечения промышленной чистоты (ПЧ) рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов (ЖСА) и применяемых рабочих и технологических жидкостей (РТЖ) воздушных судов (ВС) позволяет существенно сократить расход топлива, масел, рабочих жидкостей гидросистем; повысить надежность и ресурс бортового оборудования при эксплуатации ВС (как следствие повысить безопасность полетов ВС); уменьшить время нахождения ВС в ремонте (как следствие повысить боеготовность ВС); сократить трудоемкость ремонта и технического обслуживания [1].

При этом необходимо одновременное осуществление в полном объеме:

- технологических и организационных мероприятий по очистке и поддержанию требуемого уровня чистоты рабочих полостей ЖСА и применяемых РТЖ;

- мероприятий по обеспечению контроля уровня загрязненности ЖСА и РТЖ.

Ввиду значимости качественной очистки ЖСА для обеспечения безопасности полетов ВС, и с учетом того, что загрязнение происходит при их изготовлении, монтаже, начальном этапе работы (приработке), эксплуатации, хранении, указанные мероприятия должны безусловно выполняться на всех этапах жизненного цикла ВС – при производстве, ремонте, техническом обслуживании, эксплуатации.

Указанные выше направления обеспечения ПЧ касаются как совершенствования технологических процессов обеспечения требуемого (нормативного) уровня ПЧ рабочих полостей бортовых ЖСА ВС, так и жидкостных систем, входящих в конструкцию средств наземного обслуживания (СНО) ВС, периодически подключаемых к бортовым системам при ремонте и техническом обслуживании.

Нормативные требования, предъявляемые к чистоте рабочих полостей ЖСА изделий авиационной техники (АТ) достаточно высоки [2], требуют существенных материальных и временных затрат. Например, чистота рабочих полостей гидравлических систем должна быть обеспечена на уровне:

- в производстве агрегатов гидросистем не хуже 5 – 6 класса чистоты;
- в эксплуатации ВС – не хуже 8 класса по ГОСТ 17216-2001.

При этом, ввиду особой опасности частиц загрязнений определенных размеров, допускается в соответствии с «Методическими указаниями по назначению норм и определению чистоты жидкостей внутренних полостей топливных, масляных и гидравлических систем» (МУ 48-79) назначать смешанные классы чистоты, например, один для частиц размером до 50 мкм, другой для частиц размером свыше 50 мкм и волокон. Так, при общем требовании обеспечения 8-го класса чистоты собранных гидравлических систем ВС при производстве, класс по размерной фракции частиц загрязнения 10 – 25 мкм должен быть не хуже 5 – 6-го по ГОСТ 17216- 2001 [2].

## **Гидроимпульсная очистка рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов**

Анализ существующих (применяемых в реальных производственных условиях) и перспективных методов и средств очистки таких технически сложных жидкостных систем, как применяемые в изделиях АТ, показывает, что наиболее эффективными технологиями их очистки являются технологии, основанные на прокачке их внутренних полостей жидкостью с неустановившимся (нестационарным) режимом течения, при котором возрастают пристенные скорости потока в сравнении с прокачкой ламинарным или турбулентным потоком жидкости. На рисунке 1 представлены эпюры скоростей жидкости при ламинарном 1, турбулентном 2, неустановившемся 3 режиме течения жидкости.

Преимущество технологий промывки неустановившимся потоком жидкости обусловлено следующим:

- касательные напряжения на стенках очищаемых каналов при организации неустановившихся режимов течения жидкости значительно (более чем в 10 раз) превышают касательные напряжения при стационарном течении, что пропорционально увеличивает гидродинамическое воздействие на частицы загрязнений;

- максимальное количество частиц (до 100%) отрывается от стенок непрямолинейных каналов только при организации неустановившегося режима течения жидкости;

- увеличение амплитудных характеристик неустановившегося режима течения жидкости приводит к увеличению касательных напряжений на очищаемых поверхностях.

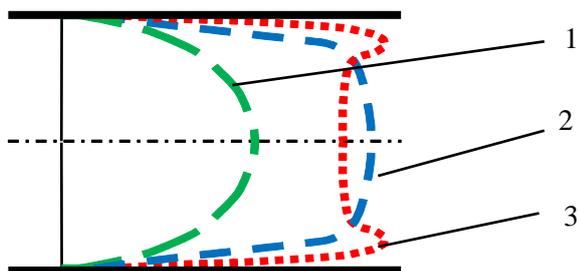


Рисунок 1 – Эпюры скоростей жидкости при ламинарном 1, турбулентном 2, неустановившемся 3 режимах течения жидкости

Однако существующие методы реализации технологии ограничивают область ее применения системами и агрегатами, обладающими достаточно высокими эксплуатационными (соответственно и разрушающими) давлениями.

В полостях проточных объектов очистки на практике неустановившийся режим течения жидкости реализуется либо периодическим перекрытием проходного сечения на входе или выходе, либо периодическим вводом под избыточным давлением дополнительных объемов жидкости или газа [1, 2]. В полостях непроточных объектов очистки периодическое течение жидкости реализуется под действием переменного давления на входе и полностью обуславливается

сжимаемостью жидкости и податливостью стенок конструкции агрегата. В обоих случаях эффективность процессов очистки определяется величиной максимального значения давления жидкости, ограниченного допустимыми эксплуатационными (и разрушающими) значениями для конкретных объектов очистки и способностью объекта очистки гасить колебания давления по мере удаления от их источника.

Существует большое число агрегатов жидкостных систем ВС, характеризующихся эксплуатационными давлениями, в пределах которых невозможно реализовать эффективные режимы существующих методов гидродинамической очистки.

Целенаправленные исследования в направлении совершенствования метода промывки ЖСА неустановившимся потоком жидкости привели к созданию технологии, суть которой состоит в том, что неустановившийся режим течения жидкости создают периодическим изменением ее расхода от нулевого значения до значения, определяемого давлением жидкости, не превышающим эксплуатационного давления для очищаемого изделия путем поочередного перераспределения потока жидкости между двумя очищаемыми изделиями [3].

Периодическому изменению расхода жидкости в максимально возможном диапазоне, определяемому заданным давлением, соответствует периодическое изменение ее скорости, также в максимально возможном диапазоне. Таким образом, при организации по разработанному методу очистки неустановившегося режима течения жидкости достигается максимально возможная амплитуда колебаний скорости, которая и определяет степень турбулентности потока, величину

касательных напряжений трения на очищаемой поверхности и другие факторы, влияющие на интенсивность отрыва и выноса загрязнений. В результате обеспечивается максимальная очищающая способность потока для конкретного очищаемого изделия.

Очистку по предложенному методу производят при давлении, не превышающем эксплуатационного. Указанное обстоятельство позволяет организовывать неустановившийся поток моющей жидкости с максимальной очищающей способностью и в тонкостенных полых изделиях с низкими эксплуатационными и разрушающими давлениями.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема установки для реализации предложенного метода при очистке рабочих полостей воздушно-масляного радиатора ВМР 2281Б вертолета МИ-8.

Работа установки осуществляется следующим образом. Моющую жидкость из расходной емкости с помощью насоса с заданными расходом и давлением подают на вход гидромеханического пульсатора жидкости [4]. Пульсатор жидкости перераспределяет поток моющей жидкости поочередно в один из выходных каналов, при этом перекрытия проходного сечения для устройства в целом не происходит, следовательно, устройство не создает колебаний давления жидкости. Устройство гидромеханического пульсатора жидкости представлено на рисунке 3.

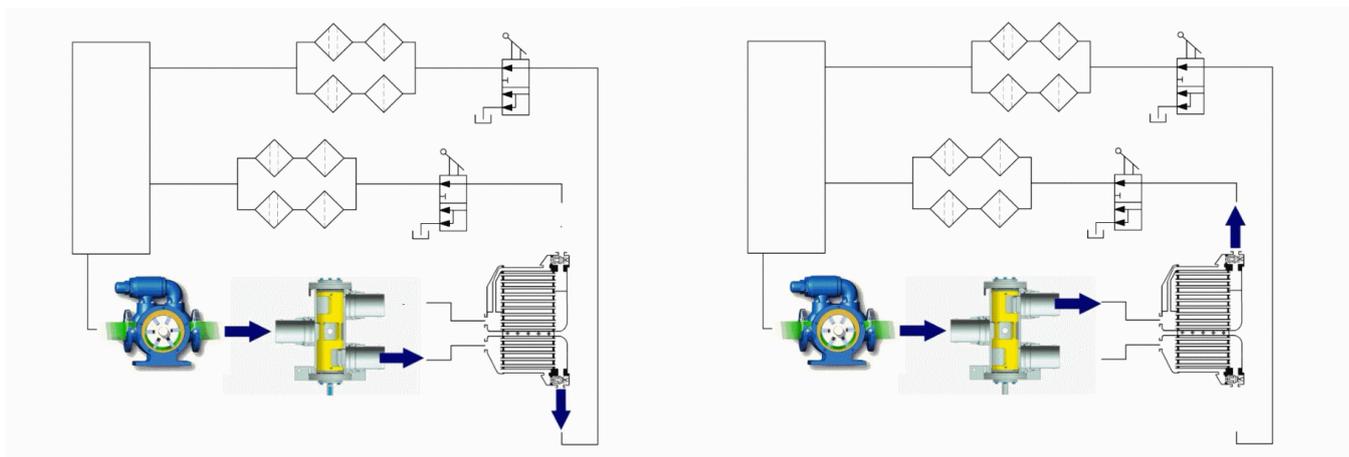


Рисунок 2 – Схема установки для осуществления гидроимпульсного метода промывки с периодическим изменением расхода жидкости

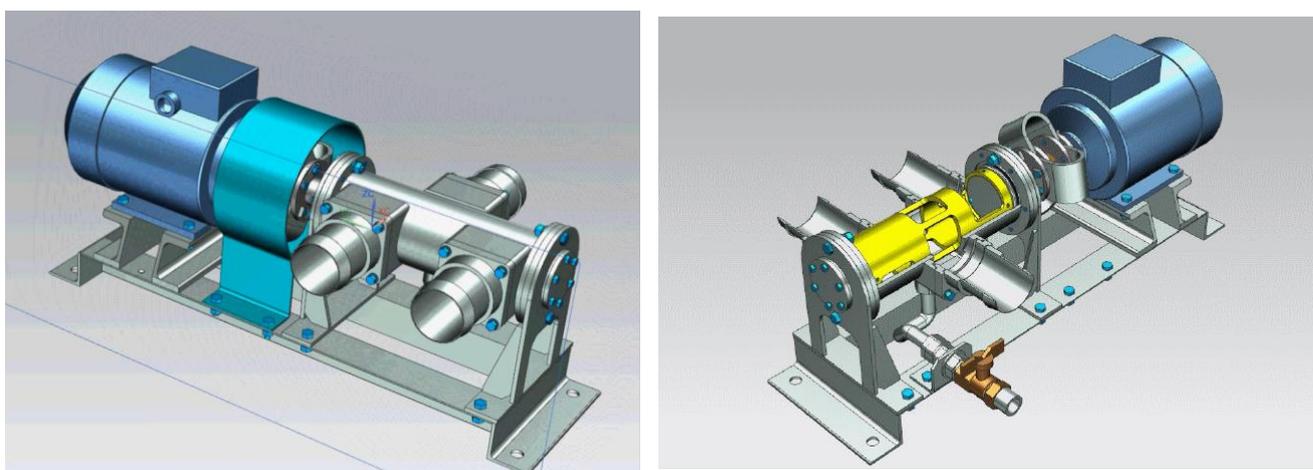


Рисунок 3 – Гидромеханический пульсатор жидкости

Из выходных каналов пульсатора жидкости поток жидкости попеременно направляется в очищаемые полые изделия и далее в расходный бак. Гидродинамическое воздействие на частицу загрязнения при разных режимах течения жидкости показано на рисунках 4 и 5. Таким образом, в каждом из очищаемых изделий расход жидкости попеременно изменяется от 0 до

установленного значения. Это создает в очищаемых полостях объектов очистки неустановившийся режим течения моющей жидкости, характеризующийся периодическим изменением скорости в максимально возможном, установленном насосом, диапазоне, придавая ему максимальную для изделия очищающую способность [6].

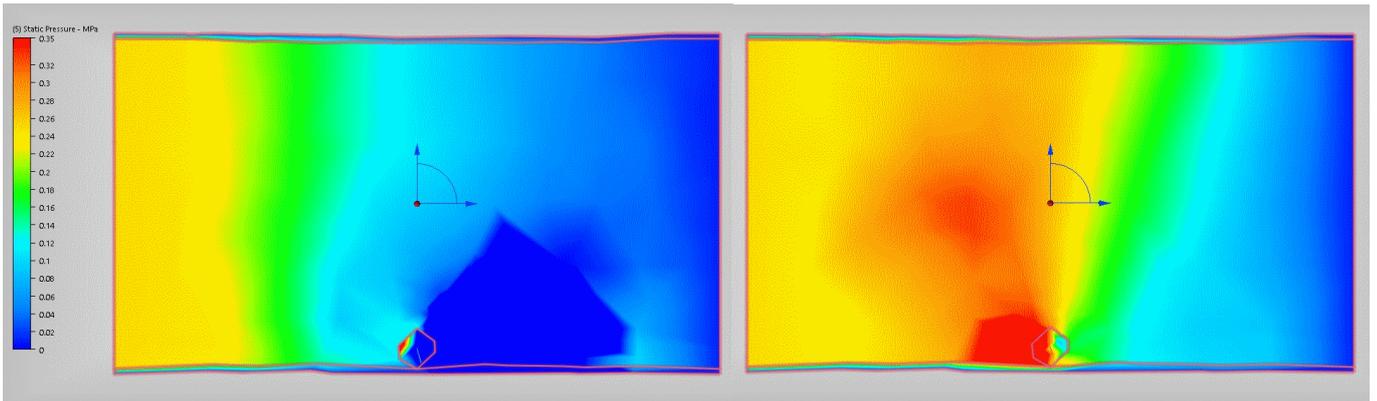


Рисунок 4 – Силовое воздействие на частицу загрязнения при гидроимпульсной промывке при постоянном давлении  $P = 0,25$  МПа и изменяющейся с частотой 100 Гц скорости  $V$  от 0 до 30 м/с в трубопроводе диаметром 50 мм

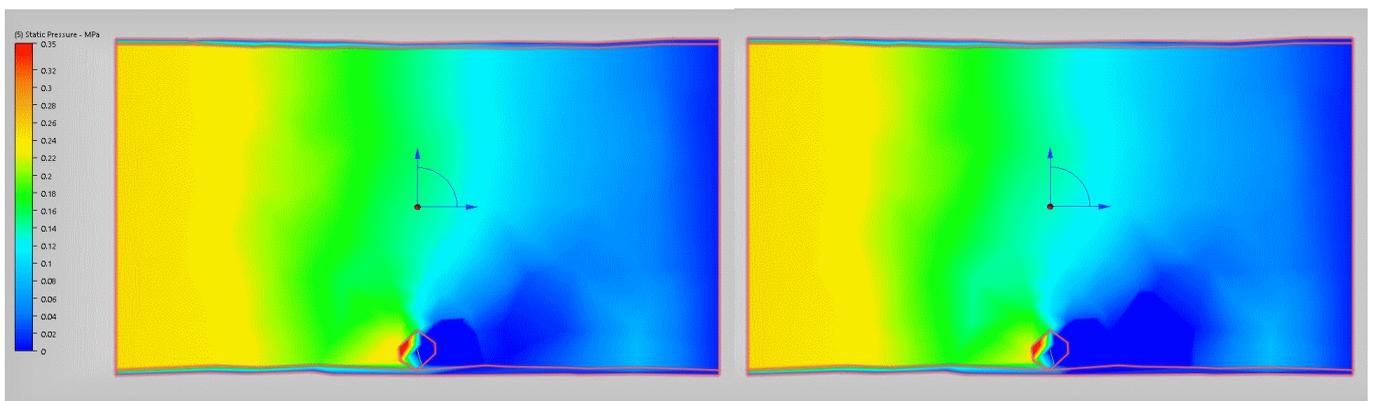


Рисунок 5 – Силовое воздействие на частицу загрязнения при обычной промывке ( $P = 0,25$  МПа,  $V_{const} = 30$  м/с)

Представленная технология может быть реализована как полноценными промывочными стендами на базе механического пульсатора жидкости, содержащими в своей конструкции насосный агрегат, расходные емкости, средства очистки моющей жидкости и пр., так и технологическими приставками к существующему промывочному оборудованию. Технологические приставки преобразуют традиционную технологию промывки в высокоэффективную гидроимпульсную. Опытные образцы технологических приставок к промывочному оборудованию представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Технологические приставки на базе гидромеханического пульсатора жидкости к существующему промывочному оборудованию.

На рисунке 7 представлен стенд для гидроимпульсной очистки воздушно-масляного радиатора ВМР 2281Б и его радиаторная секция охлаждения масла редуктора вертолета, доработанная для исследования и отработки технологических режимов гидроимпульсной очистки.

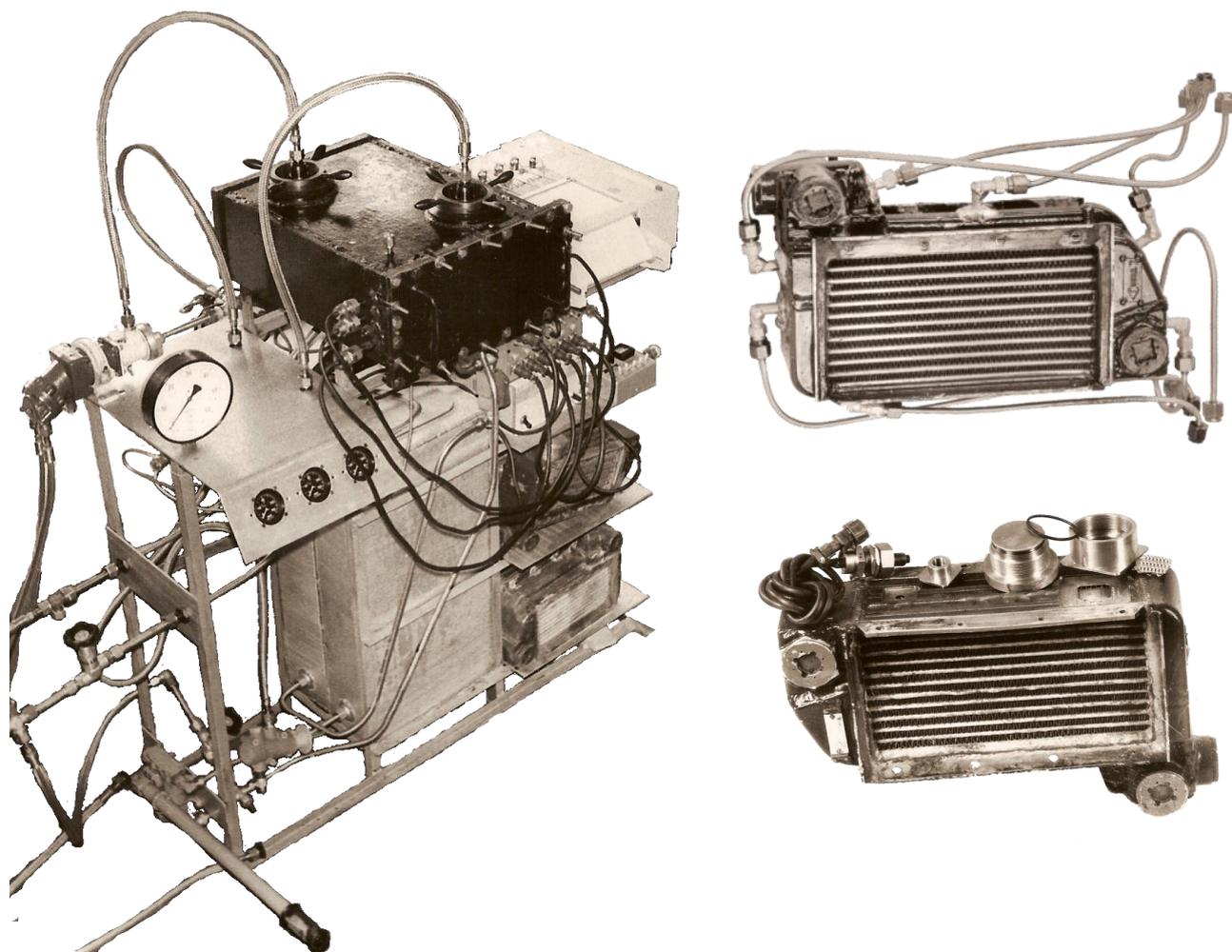


Рисунок 7 – Стенд для гидроимпульсной очистки радиатора ВМР 2281Б и доработанные для исследований секции радиатора

Визуализация процесса очистки при экспериментальной отработке технологических режимов очистки осуществлялась на искусственно загрязненных вкладышах - имитаторах внутренней полости очищаемого агрегата. На рисунке 8 представлены искусственно загрязненные вкладыши до и после их очистки гидроимпульсным и традиционным методами.

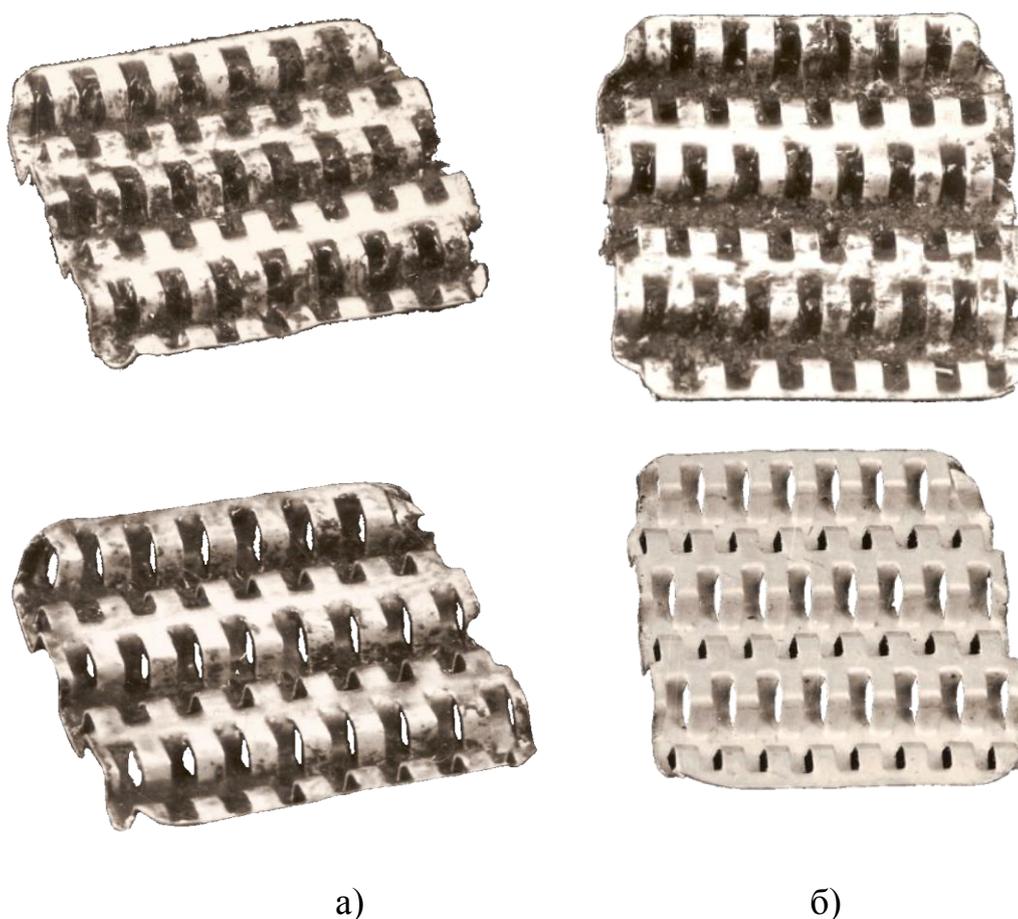


Рисунок 8 - Визуализация процесса очистки искусственно загрязненного вкладыша-имитатора внутренней полости очищаемого агрегата:

а) очистка традиционным методом, б) гидроимпульсная очистка

## **Применение разработанной технологии гидроимпульсной очистки рабочих полостей жидкостных систем в других отраслях**

Большую сложность для очистки по ряду причин представляют собой теплообменные устройства, свойством загрязнения которых является образование при эксплуатации устройств коксоотложений на внутренних стенках в результате физико-химических преобразований рабочих жидкостей [5]. Использование разработанной технологии позволяет значительно интенсифицировать процесс очистки таких изделий.

Она успешно реализована в производственных условиях сервисных локомотивных депо ОАО «РЖД» при очистке радиаторных секций системы охлаждения дизелей локомотивов [6], аналогичных по конструктивному устройству воздушно-масляным радиаторам ВМР 2281Б. На рисунке 9 представлен гидромеханический пульсатор жидкости в составе стенда СП-С1, реализующего технологию гидроимпульсной очистки. На рисунке 10 – сам стенд СП-С1 с размещенными на нем радиаторными секциями.

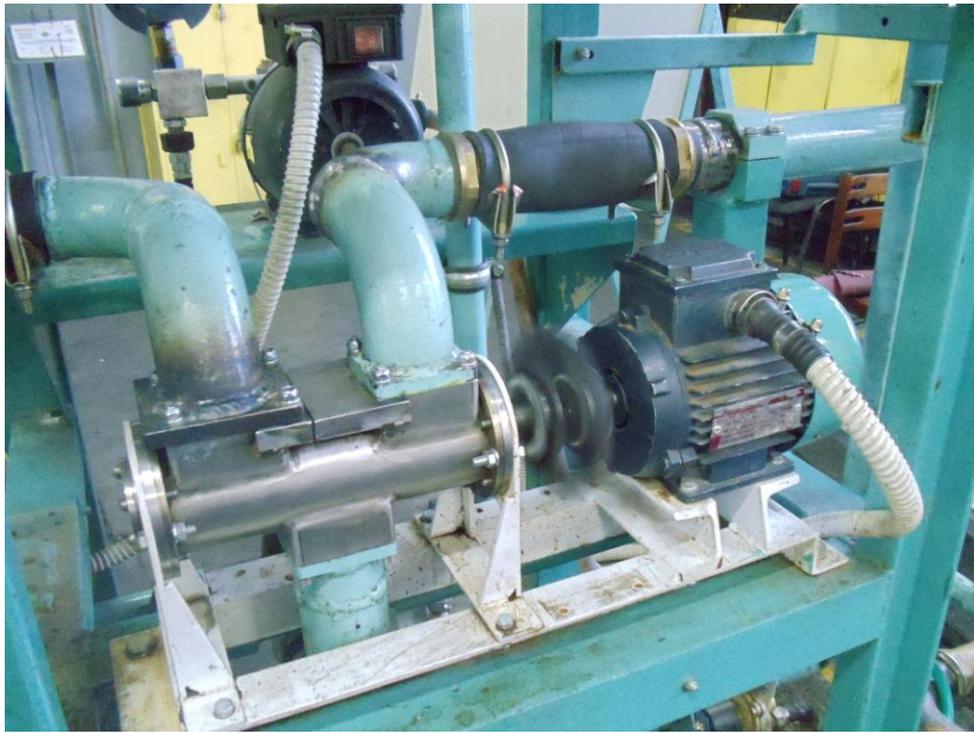


Рисунок 9 – гидромеханический пульсатор жидкости в составе промывочного  
стенда МП-С1



Рисунок 10 – Стенд СП-С1 для промывки радиаторных секций

Рисунок 11 убедительно иллюстрирует преимущества разработанной технологии гидроимпульсной очистки перед традиционными методами. На нем

представлена очистка калорифера кабины машиниста в реальных производственных условиях методом пыжевания со вскрытием трубной коробки за неимением других эффективных методов «до» и гидроимпульсным методом после внедрения стенда СП-С1.



а)



б)

Рисунок 11 – Технологический процесс очистки теплообменного устройства до (а) и после (б) внедрения технологии гидроимпульсной очистки

Экономический эффект от внедрения стенда СП-С1 в одном базовом ремонтном (сервисном) локомотивном депо составляет 4 976 640 рублей в год, при этом срок окупаемости стенда не превышает одного года.

### **Контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем**

Контроль уровня ПЧ ЖСА ВС является одной из важнейших технологических операций, определяющей с одной стороны допуск ВС к эксплуатации по показателям ПЧ, с другой стороны при производстве, ремонте и ТО ВС

определяющей момент прекращения выполнения технологической операции очистки ЖСА, занимающей существенную часть в общей продолжительности работ по их обслуживанию. Вопросы влияния качества контроля на показатели надежности систем ответственного применения, к каковым относятся и бортовые ЖСА ВС, не подлежат сомнению [7].

Многочисленными ГОСТами, ОСТами, руководящими техническими материалами, например [8], контроль ПЧ рабочих полостей ЖСА допускается проводить как прямыми методами, основанными на непосредственном измерении загрязнений на очищаемых поверхностях рабочих (внутренних) полостей, так и методами косвенного контроля, когда за показатель уровня чистоты полостей ЖСА условно принимают некий показатель функционирующей системы, так или иначе связанный с уровнем загрязненности. Таким косвенным показателем может быть, например, перепад давления на входе и выходе из загрязненной системы в сравнении с перепадом давления заведомо чистой системы (метод применяется для сильно загрязняющихся неотчетливых ЖСА, или как промежуточный метод для ответственных жидкостных устройств).

Современные авиационные жидкостные системы представляют собой сложнейшие технические системы, состоящие из множества подсистем, включающих трубопроводные магистрали и набор функциональных агрегатов, применить к которым прямые методы контроля не только затруднительно, но и, особенно в отношении собранных систем, практически невозможно.

Учитывая практические трудности измерения загрязненности внутренних поверхностей рабочих полостей таких систем методами прямого контроля для изделий АТ в подавляющем большинстве случаев применяется метод косвенного контроля, когда за показатели загрязненности рабочих полостей принимают показатели загрязненности жидкости, прокачиваемой через эти полости. Чистота поверхностей при этом оценивается по измерению концентрации (массовой, объемной, или той и другой) или счетной концентрации (гранулометрического, дисперсного состава) загрязнений в вытекающей из контролируемых ЖСА жидкости.

Косвенный контроль предполагает отбор пробы жидкости заданного соответствующими нормативными документами объема для его последующего анализа в лабораторных условиях или с использованием приборов автоматического контроля состояния загрязненности.

Соответственно, методика отбора пробы, как совокупность операций с применением средств отбора проб, должна обеспечивать представительность этой самой пробы, которая зависит от соблюдения ряда условий:

- пробы, взятые из сливного трубопровода, должны иметь такой же состав загрязнений, как и усредненный состав по сечению трубопровода в месте отбора этих проб, для чего необходимо обеспечить равномерное распределение загрязнений по площади сечения трубопровода и применение пробоотборных устройств, конструкция и параметры которых вносят минимальную погрешность в отбор проб;

- в связи с тем, что в течение установленного временем процесса контроля (или очистки) содержание загрязнений по площади сечения в точке отбора проб может по разным причинам меняться случайным образом в широких пределах, для сохранения представительности пробы частота отбора дискретных проб должна быть обоснованной, что в большинстве случаев определяется экспериментально и зависит от состава и свойств загрязнителя, особенностей очищаемой (контролируемой) системы, особенностей промывочного оборудования и самих устройств отбора проб.

- поскольку проба отбирается для последующего анализа, необходимо обеспечение сохранения ее достоверности при транспортировке до места лабораторного анализа или до соответствующих приборов автоматического контроля загрязненности.

Перечисленные выше условия являются при отборе проб критичными, невыполнение любого из них влечет нарушение представительности пробы и, соответственно, приводит к ошибочной оценке состояния ПЧ контролируемых ЖСА. Обеспечить соблюдение этих условий в совокупности чрезвычайно затруднительно. Подтверждением этому являются исследования с использованием экспериментального пробоотборного устройства (рисунок 12), позволяющего зондировать заборным соплом всю площадь поперечного сечения потока жидкости в точке отбора проб жидкости. Определено, что в сложных жидкостных системах изделий АТ обеспечить выполнение этих условий практически невозможно. Поэтому основным источником погрешностей при определении степени

загрязненности рабочих полостей ЖСА при косвенном методе контроля становится процедура отбора проб жидкости.

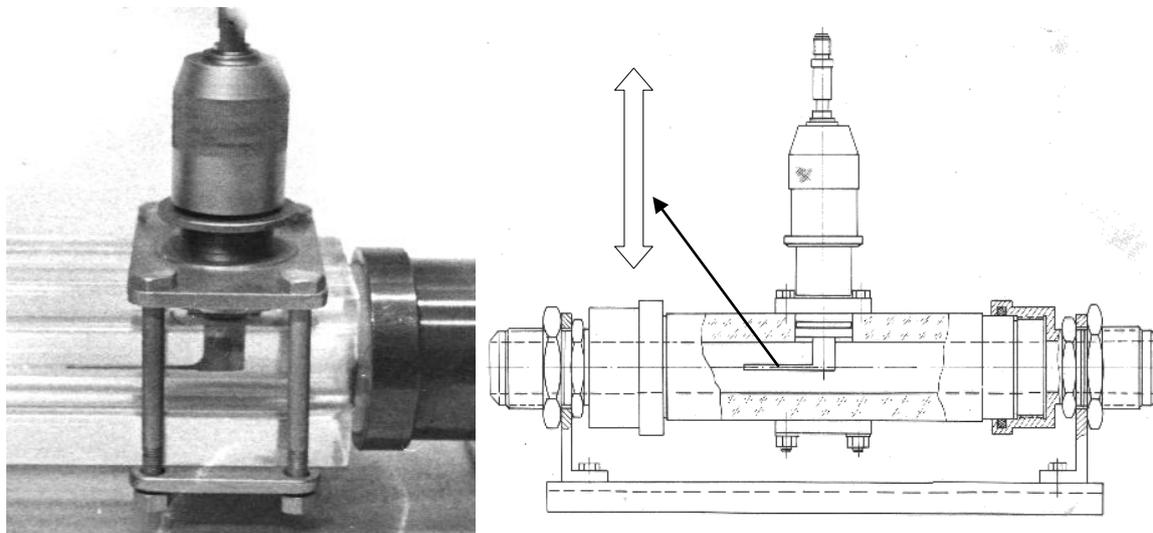


Рисунок 12 – Экспериментальный пробоотборник  
с зондирующим заборным соплом

Учитывая то, что достоверность взятой пробы и ее соответствие реальному уровню загрязненности полостей ЖСА является основой для принятия важных решений, обеспечивающих штатный режим работы как самих систем, так и изделий АТ в целом, в условиях невозможности применения методов прямого контроля загрязненности внутренних поверхностей систем, к процедуре отбора проб жидкости следует подходить особенно ответственно.

Анализ существующих методов и средств отбора проб жидкости показывает, что одно из направлений увеличения достоверности пробы жидкости лежит в осуществлении так называемого изокINETического метода отбора, при котором скорость и направление отбора проб жидкости соответствующими устройствами

равна скорости потока жидкости в точке отбора проб. Если скорость жидкости в пробоотборнике не совпадает со скоростью в основном потоке, то линии тока жидкости искривляются. Так как частицы загрязнений имеют конечные массу и объем, они не могут полностью следовать искривленным линиям тока, обусловленным неравенством скоростей, вследствие этого появляются ошибки при отборе проб. Для отбора проб при изокINETических условиях требуется тщательно выбирать объемную скорость потока в пробоотборнике и диаметр сопла пробоотборника, что требует целенаправленного конструирования пробоотборных устройств под характеристики конкретных контролируемых ЖСА.

Целесообразным для повышения достоверности результатов измерений загрязненности представляется применение полнопоточных устройств отбора проб (примеры разработки ОАО «НИИАСПК» и ООО «РИИТ» совместно с ВУНЦ ВВС «ВВА» представлены на рисунке 13).

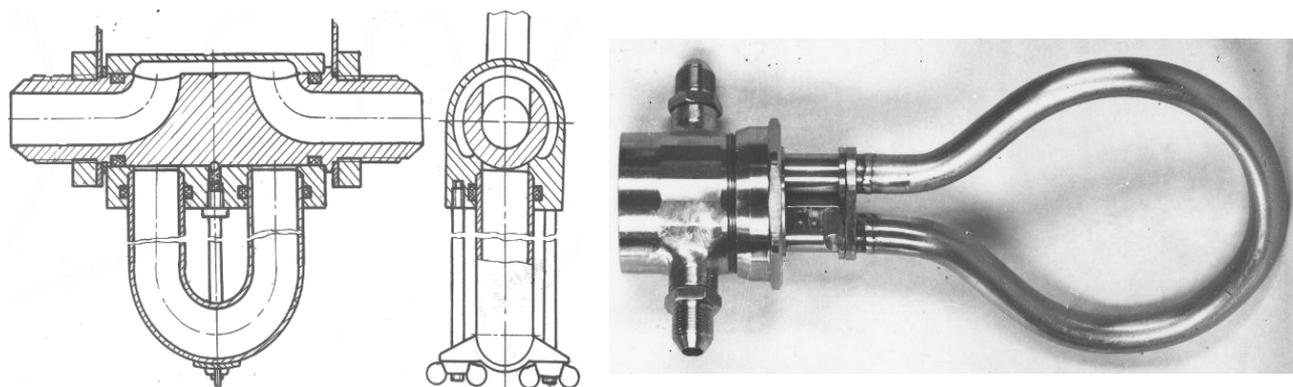


Рисунок 13 – Типовые конструкции полнопоточных пробоотборников  
(экспериментальные образцы)

Полость пробоотборника требуемого нормативного объема в процессе функционирования контролируемой системы является ее частью в точке отбора, а на момент отбора пробы отсекается от потока (жидкость одновременно перенаправляется через байпасный участок трубопровода). Контейнер с отобранной пробой извлекается из пробоотборника и направляется на анализ.

На рисунке 14 представлена схема разработанного авторами полнопоточного пробоотборника для использования в наземном стендовом оборудовании.

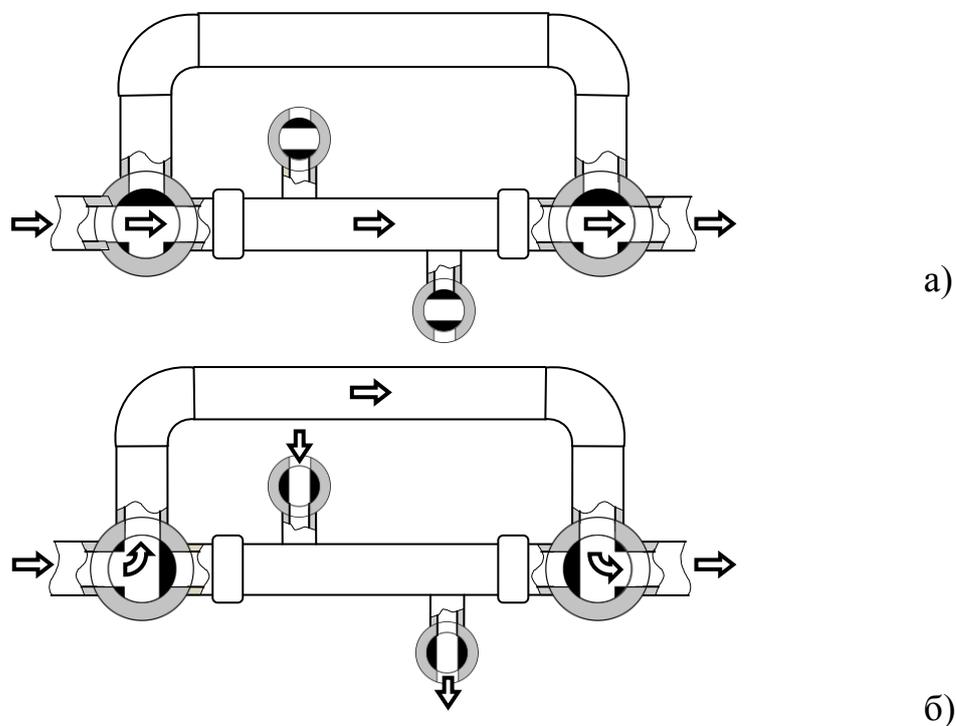
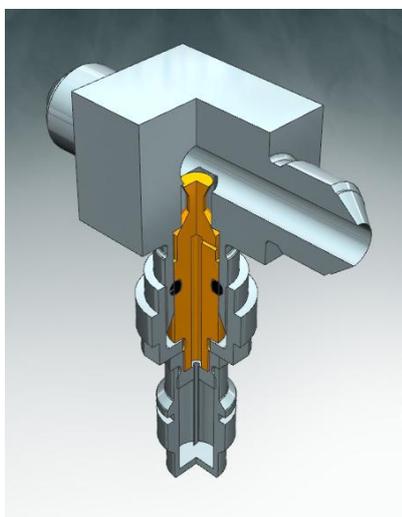


Рисунок 14 – Схема полнопоточного пробоотборника, разработанного для использования в наземном стендовом оборудовании в рабочем режиме (а) и в режиме отбора пробы (б)

Преимуществом разработанного пробоотборника является возможность повышения представительности пробы за счет минимизации погрешности ее отбора.

Другим направлением повышения достоверности оценки состояния загрязненности рабочих полостей систем, является определение объективных точек отбора пробы, где жидкость по своему составу, свойствам или структуре полностью идентична объекту аналитического контроля, от которого она отбирается. В связи со значительной сложностью геометрической конфигурацией жидкостных систем современных воздушных судов, пробоотборные устройства должны быть минимизированы по габаритным и весовым параметрам, должны иметь возможность быть встраиваемыми в бортовые масляные, топливные, гидравлические и прочие жидкостные системы воздушных судов.

На рисунке 15 представлен разработанный экспериментальный образец игольчатого пробоотборника, внедренный при производстве серийной продукции в НЭЦ предприятия ОАО «НИИАСПК» (авиапром).



а)



б)



в)

Рисунок 15 – Экспериментальный пробоотборник для встраивания в бортовые системы воздушных судов: а) в разрезе, б) в сборе, в) в разобранном виде

На настоящий момент опытный образец пробоотборника внедрен в производственный процесс одного из предприятий авиапрома при производстве серийной продукции и проходит апробацию в составе стендового оборудования для очистки и испытания трубопроводных систем воздушных судов при их изготовлении.

Таким образом, при невозможности прямой оценки загрязненности поверхностей внутренних полостей ЖСА ВС и СТО и возникающей при этом необходимости применения косвенного метода контроля ПЧ по чистоте вытекающей жидкости, направление повышения достоверности результатов измерений лежит в области совершенствования пробоотборных устройств полнопоточного типа и определения объективных точек забора проб жидкости.

### **Выводы**

Комплексное решение проблем обеспечения промышленной чистоты жидкостных систем ВС приводит к следующему положительному эффекту:

Экономическая составляющая:

- снижение трудоемкости производства, ремонта, технического обслуживания;
- экономия применяемых рабочих жидкостей.

Эксплуатационная составляющая:

- повышение надежности и ресурса ЖСА;
- экономия топлива и других жидкостей;

Результатом положительного эффекта является повышение безопасности полетов и боеготовности ВС.

Представленные методы совершенствования процессов очистки и контроля промышленной чистоты имеют межвидовое и межотраслевое значение и могут быть использованы при производстве, ремонте, техническом обслуживании вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) и других машиностроительных изделий, содержащих в своей конструкции жидкостные (масляные, силовые гидравлические, топливные и пр.) системы и агрегаты. А именно:

- вооружение (системы управления оружием с гидравлическим приводом);
- воздушные суда (самолеты, вертолеты);
- наземные подвижные объекты (автобронетанковые, железнодорожные, строительные и прочие);
- надводные и подводные объекты Военно-морского флота;
- силовые установки указанных выше объектов;
- средства их наземного обслуживания, заправки, консервации и т.д.

### **Библиографический список**

1. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. - М.: Машиностроение, 1982. 224 с.
2. Производство гидрогазовых и топливных систем. Часть 2. Монтаж, контроль и испытание гидрогазовых и топливных систем. Руководящие технические материалы РТМ-1.4.535-89. - М.: НИАТ, 1991. 243 с.

3. Способ очистки полых изделий. Патент РФ № 2552450 / Кровяков В.Б., 2015, URL: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2552450.html>

4. Генератор колебаний жидкости. Патент РФ № 132846 / Кровяков В.Б., Бирюков М.И., 2013, URL: <http://poleznayamodel.ru/model/13/132846.html>

5 Яновский Л.С., Казаков В.А., Павлов В.В. Моделирование процессов тепло- и массообмена биотоплив в трубопроводах авиационных теплообменников // Труды МАИ, 2012, 56: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30309>

6. Иванов В.Г., Ремезов А.С., Кровяков В.Б. Промывка радиаторных секций охлаждающей системы тепловозов: проблемы и пути их решения // Локомотив. 2015. № 1. С. 11-13.

7. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ», 2016, № 85: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67501>

8. Сапожников В.М. Монтаж и испытание гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1979. 256 с.