

УДК 621.7.024.2

## **Совершенствование средств мониторинга состояния жидкостных систем воздушных судов по параметрам промышленной чистоты**

**Степанов Р.Н.\*, Кожевников И.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,*

*\*e-mail: [ramon90@bk.ru](mailto:ramon90@bk.ru)*

*\*\*e-mail: [79507645942@yandex.ru](mailto:79507645942@yandex.ru)*

### **Аннотация**

В работе представлены результаты исследования траектории движения частиц загрязнителя в потоке жидкости и их распределения по сечению трубопровода. На основе выполненных исследований и анализа существующих методов и средств контроля уровня загрязненности рабочих полостей жидкостных систем предложены технические решения средств контроля, повышающие представительность (достоверность, объективность) отбираемых для последующего анализа проб жидкости.

**Ключевые слова:** промышленная чистота, пробоотборное устройство, контроль, проба, очистка, промывка, жидкостная система, полость.

Более 50% инцидентов и отказов авиационной техники (АТ) связано с неисправностями и отказами жидкостных систем и агрегатов (ЖСА) воздушных

судов (ВС). При этом повышенная (ненормативная) загрязненность, как показывает отечественный и зарубежный опыт, является в 70 – 90 % случаев причиной отказов агрегатов жидкостных систем и в 50 % случаев – отказов газотурбинных двигателей. Эти отказы представляют большую опасность, поскольку наиболее часто проявляются в полете ВС [1], что обуславливает необходимость изыскания эффективных методов и средств обеспечения требуемого уровня промышленной чистоты (ПЧ) как самих систем, так и применяемых рабочих сред [2, 3, 4].

Комплексное решение проблем обеспечения ПЧ ЖСА предполагает одновременное решение в полном объеме трех задач: очистки применяемых рабочих и технологических жидкостных сред, очистки непосредственно рабочих полостей ЖСА до установленного нормативного уровня, контроля уровня загрязненности ЖСА и применяемых рабочих сред [5, 6].

При выполнении специалистами ВУНЦ ВВС «ВВА» совместно с ЦНИИ ВВС МО РФ по заказу Службы безопасности полетов авиации Вооруженных Сил Минобороны России исследований в области совершенствования технологий и оборудования для обеспечения требуемого уровня ПЧ рабочих полостей ЖСА ВС для предотвращения авиационных происшествий и повышения безопасности полетов выявлен существенный пробел в области обеспечения контроля уровня загрязненности рабочих полостей бортовых ЖСА [7].

В связи с этим одним из существенно важных направлений работ по повышению надежности бортовых ЖСА (соответственно и повышению безопасности полетов ВС) является совершенствование существующих и разработка

новых эффективных методов и средств диагностирования их технического состояния по показателям загрязненности [8].

Сравнение фактического уровня загрязненности по гранулометрическому составу с нормативным, установленным разработчиком систем, позволяет определять возможность дальнейшей эксплуатации ВС и прогнозировать остаточный ресурс агрегатов систем, а при техническом обслуживании определять момент прекращения технологической операции промывки загрязненных систем, занимающей существенную часть в общей продолжительности работ по их обслуживанию [9].

Следует отметить, что если с контролем загрязненности рабочих жидкостей при эксплуатации ВС и при их техническом обслуживании все обстоит более-менее благополучно (имеется большое количество методов и средств лабораторного и автоматического контроля загрязненности жидкостей) [10], то при определении (измерении) загрязненности рабочих (внутренних) полостей ЖСА возникают определенные трудности, обусловленные их сложным конструктивным устройством. Учитывая практические трудности измерения загрязненности поверхностей рабочих полостей систем методами прямого контроля для изделий авиационной техники в подавляющем большинстве случаев применяется метод косвенного контроля, когда за показатели загрязненности рабочих полостей принимают показатели загрязненности циркулирующей в системе жидкости [7, 11, 12].

В идеальном случае системно-направленный мониторинг степени загрязненности рабочих полостей ЖСА должен обеспечивать возможность

прогнозирования отказов наиболее важных жидкостных агрегатов в реальном времени во время полета и при различных видах подготовки ВС к полету.

Эта задача может быть решена оснащением бортовых жидкостных систем ВС датчиками встроенного контроля технического состояния жидкостных систем по изменению уровня загрязненности рабочей жидкости [13]. Однако, разработанные к настоящему времени средства встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости имеют существенные ограничения, например, разработать датчики встроенного контроля, регистрирующие частицы менее 5 мкм при наличии дестабилизирующих факторов, связанных с тяжелыми условиями эксплуатации ВС, до настоящего времени не удастся. Помимо этого датчики встроенного контроля регистрируют лишь дисперсный (гранулометрический) состав загрязнений, тогда как более глубокий? по качественным показателям, анализ загрязнений систем позволяет, используя методы и средства трибодиагностики, контролировать состояние узлов агрегатов, прогнозировать дефекты и определять их местоположение [14].

Таким образом, отбор проб жидкости из систем с целью контроля ее загрязненности и косвенного контроля загрязненности рабочих полостей самих систем остается актуальной задачей в настоящее время и в долгосрочной перспективе [15].

Важнейшей составляющей аналитического контроля любого объекта является отбор представительной пробы объекта контроля, которая по составу, свойствам или структуре принимается идентичной объекту аналитического контроля, от которого

она отобрана. При этом погрешность отбора пробы для обеспечения качества анализа должна быть минимизирована [16].

Методика отбора пробы, как совокупность операций с применением средств отбора проб, должна обеспечивать представительность этой самой пробы, которая зависит от соблюдения ряда условий [17]:

пробы, взятые из системы, должны иметь такой же состав загрязнений, как и усредненный состав по сечению трубопровода в месте отбора этих проб;

частота отбора дискретных проб и место отбора должны быть обоснованными, что в большинстве случаев определяется экспериментально и зависит от состава и свойств загрязнителя, особенностей контролируемой системы, условий эксплуатации ВС и самих устройств отбора проб;

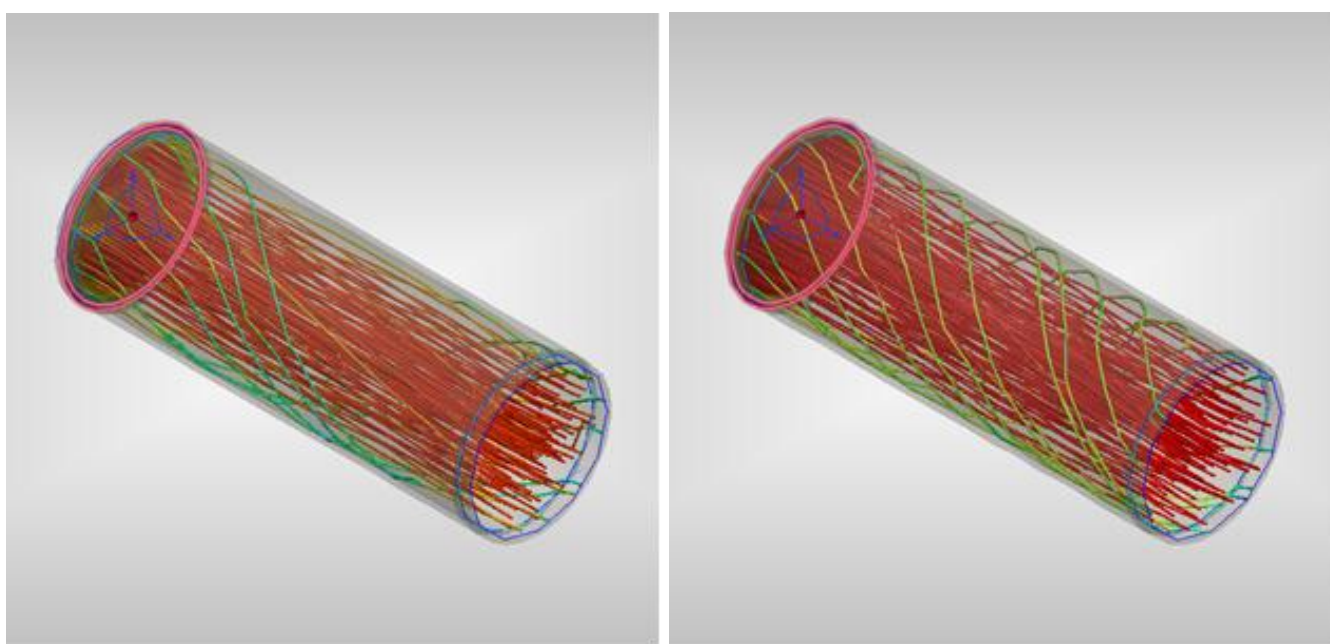
необходимо обеспечение сохранения достоверности пробы при транспортировке до места лабораторного анализа или до соответствующих приборов автоматического контроля загрязненности.

Невыполнение любого из этих условий влечет нарушение представительности пробы и, соответственно, приводит к ошибочной оценке уровня загрязненности контролируемых ЖСА.

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 ЖСА, к процедуре отбора проб жидкости следует подходить особенно ответственно.

При отборе пробы жидкости для последующего анализа необходимо учитывать особенности движения частиц загрязнений в потоке жидкости и их распределение по сечению трубопровода, так как эти характеристики напрямую влияют на представительность пробы, отбираемой с использованием разных методов пробоотборными устройствами разной конструкции.

На рисунке 1 представлены результаты компьютерного 3D моделирования движения частиц загрязнений в потоке жидкости в участке трубопроводной системы в разные моменты времени, выполненного в программной среде Autodesk Simulation CFD 2015.



а)

б)

Рисунок 1 – Траектории движения частиц загрязнения в трубопроводе:

а) траектории движения частиц загрязнения на момент времени  $T$ , б) траектории движения частиц загрязнения на момент времени  $T + 1$  с;

Выполненное моделирование показывает, траектория движения частиц загрязнений с течением времени меняется непредсказуемо.

Для моделирования распределения частиц загрязнений в потоке жидкости по сечению трубопровода создана 3D модель участка трубопроводной системы с изгибами и выбрано конкретное сечение трубопровода (рисунок 2). Выбранные случайным образом (без привязки к конкретным системам конкретных изделий АТ) параметры трубопровода следующие: толщина стенки, мм – 1,5; внутренний диаметр трубопровода, мм – 50; материал трубопровода – 12X18H10T. Трубопровод считается жестким.



Рисунок 2 – Модель трубопровода

На рисунках 3, 4 представлены результаты моделирования распределения частиц загрязнений для следующих расчетных случаев (для иллюстраций расчетные

случаи выбраны случайным образом): 1-й расчетный случай - размер  $d$  частиц загрязнения, мкм – 100; 2-й расчетный случай - размер  $d$  частиц загрязнения, мкм – 50. Параметры исследуемой системы: среда, заполняющая трубопровод – вода; плотность частиц загрязнения (металлическая стружка),  $\text{кг/м}^3$  – 7900; давление внутри трубопроводной системы, МПа – 0,25; расход жидкости, л/мин – 200;

На рисунке 3 показано распределение частиц загрязнения по сечению трубопровода для первого расчетного случая в зависимости от времени.

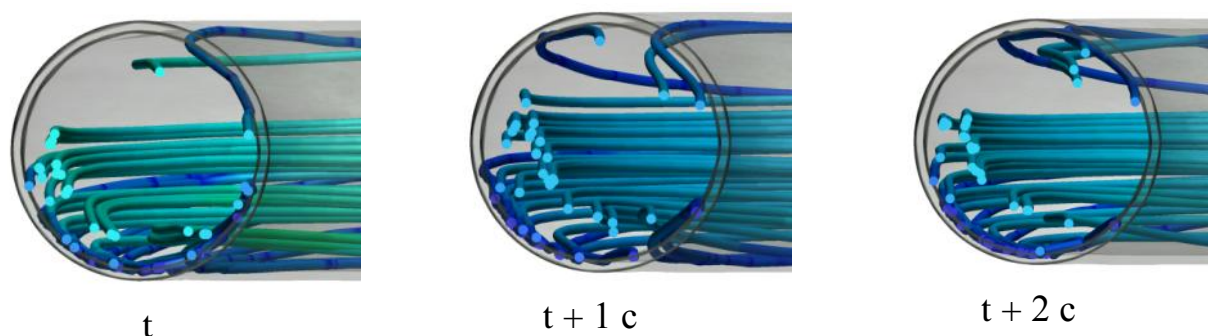


Рисунок 3 – Распределение частиц загрязнения по сечению трубопровода в различные промежутки времени,  $d = 100$  мкм

На рисунке 4 показано распределение частиц загрязнения по сечению трубопровода для второго расчетного случая.

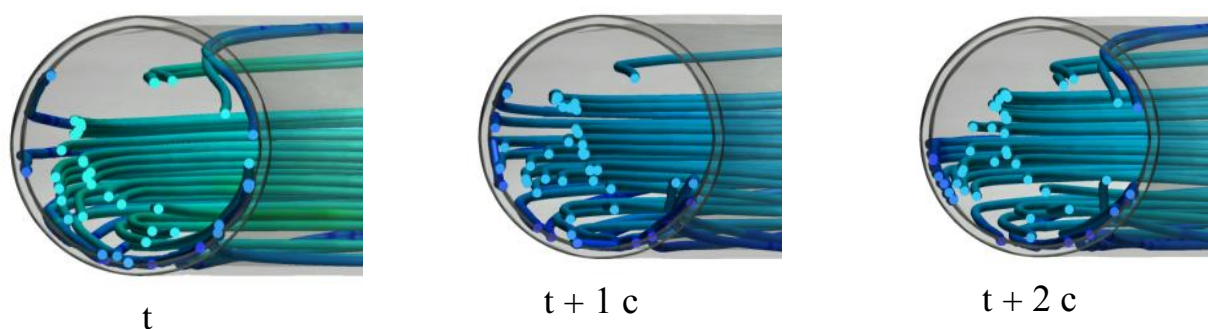




Рисунок 4 – Распределение частиц загрязнения по сечению трубопровода в различные промежутки времени,  $d = 50$  мкм

Результаты исследования при помощи компьютерного моделирования подтверждается и проведенными экспериментальными исследованиями с использованием экспериментального пробоотборного устройства, представленного на рисунке 5.

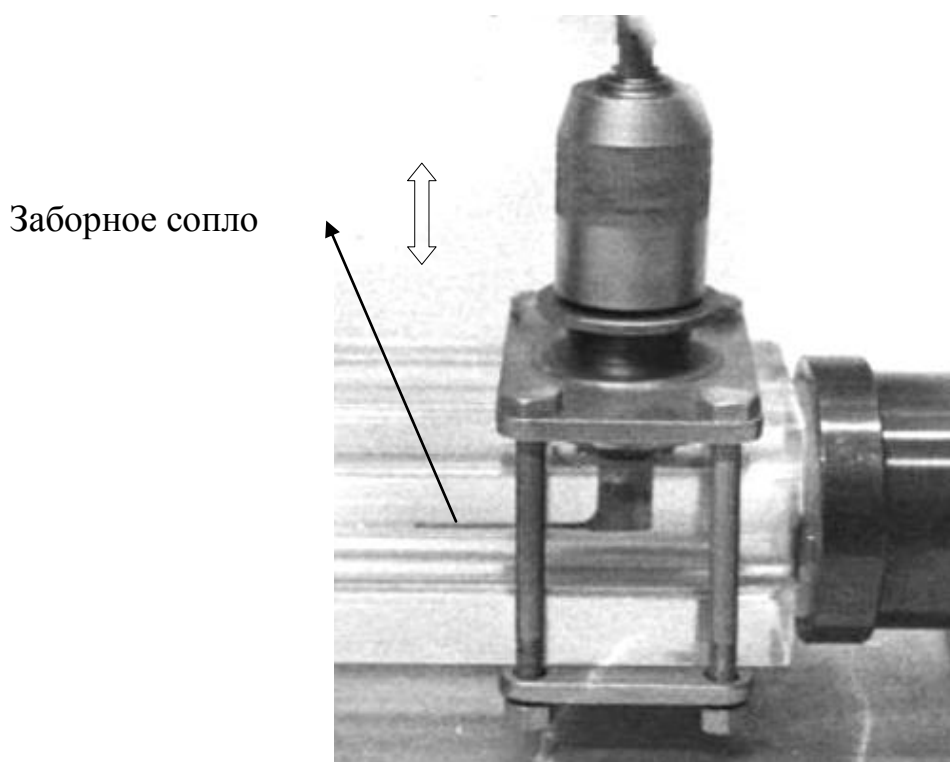


Рисунок 5 – Экспериментальный пробоотборник с зондирующим заборным соплом

Особенностью пробоотборника является возможность перемещать заборное сопло по всему диаметру исследуемого трубопровода, а возможность вращения самого пробоотборного устройства вокруг оси трубопровода позволяет зондировать заборным соплом всю площадь поперечного сечения. Таким образом

обеспечивается возможность взятия пробы из любой точки сечения трубопровода. Сам участок трубопровода выполнен из прозрачного материала для визуализации процесса отбора проб.

Выполненные исследования демонстрируют непредсказуемость распределения частиц загрязнений по сечению трубопровода в разные моменты времени даже для одинаковых начально заданных условиях в одном и том же месте одной и той же системы, что свидетельствует о невозможности обеспечения достоверности пробы жидкости при ее точечном или щелевом отборе устройствами, реализующими схемы, представленные на рисунке 6 [18].

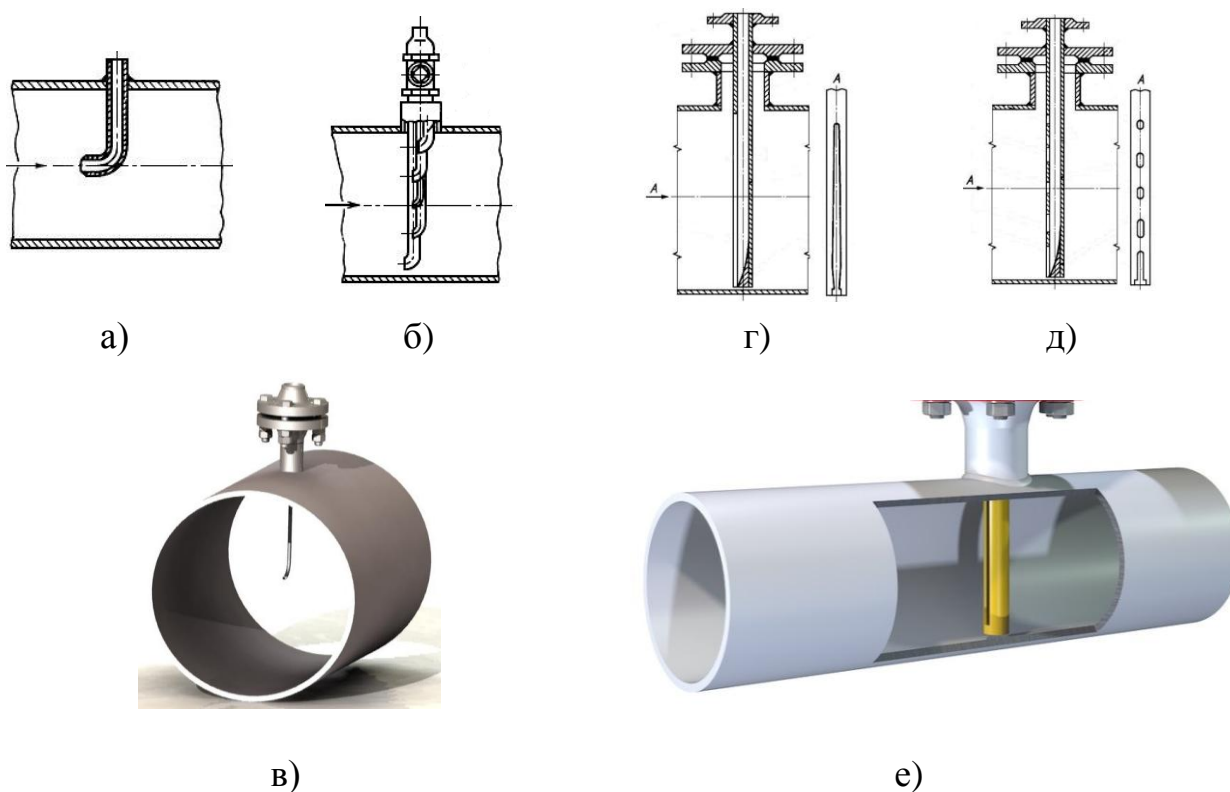


Рисунок 6 – Схемы пробоотборных устройств, реализующих точечный (а, б, в) и щелевой (г, д, е) отбор проб из потока жидкости

Тем не менее, пробоотборные устройства, реализующие представленные схемы точечного и щелевого отбора проб жидкости, широко используются в разных отраслях промышленности и в силу простоты конструкции и возможности минимизации габаритных и весовых параметров имеют право на существование. Тем более, что существует большое количество технических решений, позволяющих в той или иной степени уменьшать погрешность отобранных проб. А в некоторых случаях их весовые и габаритные преимущества превалируют над недостатком по основному назначению, например при необходимости установки в жидкостных системах в узких пространственных объемах для оперативного контроля динамики их загрязнения.

Из вышесказанного следует, что для повышения достоверности результатов измерений загрязненности систем целесообразным представляется применение полнопоточных устройств отбора проб, реализующих метод объемного отбора пробы, когда 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), извлекается из пробоотборника и направляется на анализ. При этом сам пробоотборник может использоваться в качестве контейнера для транспортировки пробы. Такие пробоотборники существуют, их применение не столь широко, как у представленных ранее, но их использование в ряде случаев определяется необходимостью максимально точного измерения [19].

Недостатком существующих полнопоточных пробоотборных устройств является то, что они не обеспечивают достаточную представительность отбираемой пробы жидкости в части ее загрязненности механическими загрязнениями по следующим причинам:

- в режиме отбора пробы (байпасная секция открыта, пробоотборная закрыта) происходит осаждение на стенках пробоотборной секции механических фракций загрязнений жидкости, которые не попадают в слитую для анализа пробу, что искажает ее представительность;

- в рабочем режиме (пробоотборная секция открыта, байпасная закрыта) происходит накопление на стенках пробоотборной секции дополнительных загрязнений, поступающих из работающей системы, которое при взятии пробы также приводит к нарушению ее представительности.

Специалистами ВУНЦ ВВС «ВВА» предложена усовершенствованная конструкция полнопоточного устройства отбора проб жидкости (патент РФ №171725) [20]. Техническим результатом предложенной конструкции является повышение представительности отбираемой пробы жидкости.

Предложенная конструкция поясняется иллюстрациями, где на рисунке 7 представлены схемы предлагаемой конструкции устройства для отбора проб жидкости в режиме работы контролируемой жидкостной системы и в режиме отбора пробы. На рисунке позициями обозначено: 1 - пробоотборная секция; 2 - отборный штуцер пробоотборной секции; 3 - входной штуцер пробоотборной секции; 4 - краны отборного и входного штуцеров; 5 - байпасная секция; 6 - контролируемая жидкостная система; 7 - трехходовые шаровые краны;



Стрелками обозначено направление течения жидкости.

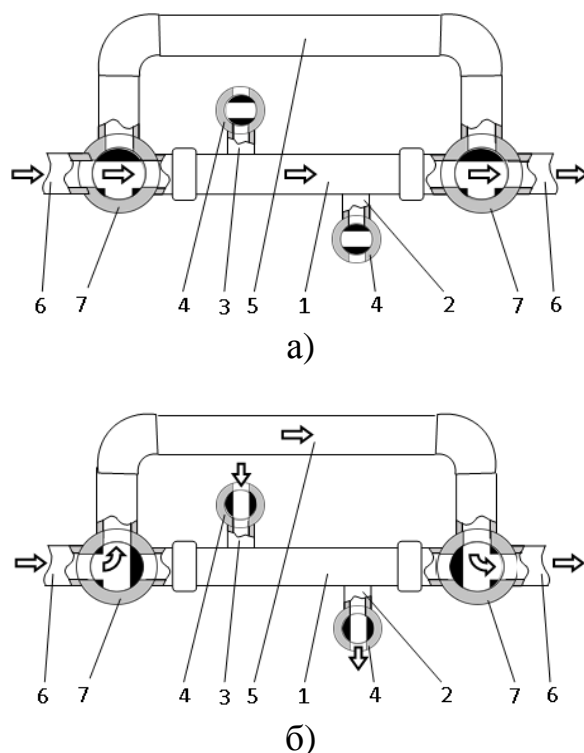


Рисунок 7 – Схематичный чертеж устройства для отбора проб жидкости: а) – в режиме работы контролируемой жидкостной системы; б) – в режиме отбора пробы

Устройство работает следующим образом. В рабочем режиме (рисунок 7а) поток жидкости контролируемой системы 6 проходит в полном объеме через трехходовые шаровые краны 7 и прободоборную секцию 1, при этом гранулометрический, физико-химический состав жидкости в прободоборной секции 1 полностью соответствует составу жидкости в контролируемой системе 6, а неравномерное распределение по сечению потока жидкости механического загрязнителя, носящее случайный характер, не оказывает влияния на представительность отсеченной пробы жидкости, поскольку прободоборная секция

1 в рабочем режиме характеризуется полным охватом поперечного сечения потока жидкости.

При необходимости отбора пробы трехходовые шаровые краны 7 посредством общей системы управления (на рисунке не показана) одновременно отсекают объем жидкости в пробоотборной, являющейся мерной, секции 1 и перенаправляют его в байпасную секцию 5, что позволяет не нарушая установленного режима работы контролируемой системы 6 производить отбор пробы жидкости (рисунок 2). Для отбора пробы жидкости открывают кран 4 отборного штуцера 2 и, для предотвращения создания разрежения во внутренней полости пробоотборной секции 1, затрудняющего вытекание жидкости, открывают кран 4 дополнительного входного штуцера 3. При нахождении отсеченной пробы жидкости в полости пробоотборной секции 1 в состоянии покоя происходит выпадение в осадок твердых фракций, содержащихся в жидкости, которые при сливе пробы самотеком остаются внутри пробоотборной секции и, не попадая в пробу, снижают ее достоверность, приводя к ошибочной оценке как состояния рабочей жидкости, так и технического состояния самой контролируемой системы и ее агрегатов.

Для повышения представительности пробы, после ее слива в предназначенную для хранения и транспортировки пробы емкость (на рисунке не показана) через входной штуцер 3 с открытым краном 4 производят промывку внутренней полости пробоотборной секции 1 заведомо чистой рабочей жидкостью контролируемой системы от внешнего источника (на рисунке не показано) со сливом через штуцер 2 с краном 4 в ту же или иную емкость в зависимости от целей

дальнейшего исследования пробы. Так же штуцеры 3 и 2 с кранами 4 используются для периодической промывки внутренней полости пробоотборной секции 1.

Промывку внутренней полости пробоотборной секции 1 с использованием входного 3 и отборного 2 штуцеров с кранами 4 осуществляют любым из известных эффективных методов промывки, например с организацией неустановившегося потока жидкости в полости секции 1, или с импульсным вводом под избыточным давлением газовой среды [21].

Общая система управления трехходовыми шаровыми кранами может быть выполнена с использованием известных технических решений: механической с ручным управлением, когда краны соединены общим валом с рычагом; или с автоматизированным управлением от пульта, если трехходовые шаровые краны оснащены пневматическим или электрическим приводом.

Таким образом, использование предложенной конструкции позволяет повысить представительность отбираемой пробы жидкости и предотвратить ошибочную оценку уровня загрязненности рабочей жидкости и технического состояния контролируемой жидкостной системы и ее агрегатов.

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 ВС, пробоотборные устройства должны быть минимизированы по габаритным и весовым параметрам, должны иметь возможность быть



встраиваемыми в бортовые масляные, топливные, гидравлические и прочие жидкостные системы ВС.

Исходя из вышеперечисленных требований, разработано устройство для точечного отбора проб жидкости, представленное на рисунке 8 [12,15].

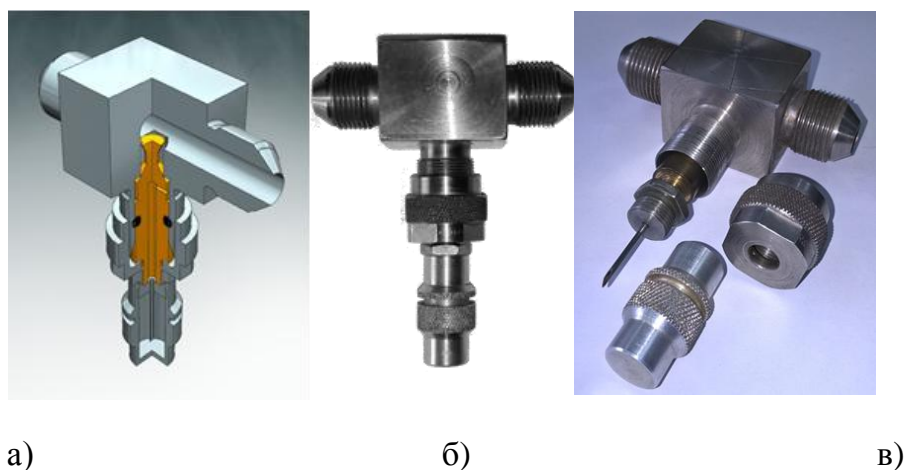


Рисунок 8 – Пробоотборное устройство для встраивания в бортовые системы ВС:

а) - в разрезе, б) - в сборе, в) - в разобранном виде.

Достоинством конструкции является то, что элемент непосредственной подачи пробы жидкости в емкость для ее транспортировки до места анализа выполнен в виде иглы, на которую накалывается эластичная пробка емкости (на рисунке не показана), что предотвращает попадание в пробу жидкости загрязнений из окружающей среды в период ее взятия и при последующей транспортировке.

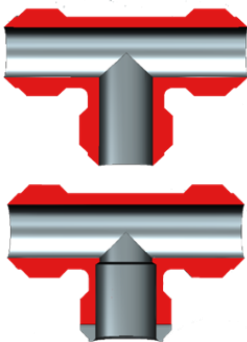
Представленный пробоотборник (рисунок 8) апробирован в реальном производстве, внедрен и используется в составе промывочного оборудования при производстве серийной продукции в ОАО «Научно-исследовательский институт

автоматизированных средств производства и контроля» (Акт внедрения утвержден Генеральным директором ОАО «НИИАСПК» 21.04.2016 г.).

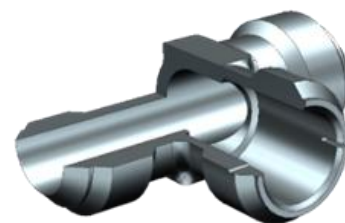
Разработанная конструкция пробоотборника отличается простотой, и возможностью в силу своих минимальных габаритных параметров быть встроенной в стандартную арматуру бортовых трубопроводных систем ВС. На рисунке 9 показана последовательность доработки нормализованного по ГОСТ 13964-74 авиационного тройника.



Стандартный  
авиационный тройник



Доработка стандартного  
тройника



Доработанный тройник



Пробоотборник на базе стандартного  
тройника в разрезе



Общий вид пробоотборника на базе  
стандартного тройника

Рисунок 9 – последовательность доработки нормализованного авиационного тройника для оснащения его элементами пробоотборного устройства

Таким образом, при невозможности прямой оценки загрязненности поверхностей внутренних полостей ЖСА ВС направление повышения достоверности результатов измерений лежит в области совершенствования пробоотборных устройств полнопоточного типа.

При необходимости оснащения бортовых систем ВС пробоотборными устройствами достоверность контроля загрязненности систем может быть достигнута определением объективных точек забора проб и использованием представленного пробоотборника точечного отбора.

### **Библиографический список**

1. Байнетов С.Д. Безопасностью полетов необходимо управлять // Авиапанорама. 2008. № 4 (70). С. 24 – 27.
2. Кровяков В.Б. Романов А.А., Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А. Гидроимпульсная очистка и контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов // Журнал Труды МАИ. 2016. № 91, URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75588>
3. Санчугов В.И., Решетов В.М., Турусин С.В. Анализ технологий очистки внутренней поверхности гидроцилиндров // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 4. С. 233 - 239.
4. 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.

5. Кровяков В.Б., Попов А.В., Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А. Влияние промышленной чистоты рабочих полостей жидкостных систем воздушных судов на безопасность полетов // Авиационная промышленность. 2017. № 2. С. 54 – 60.
6. Кровяков В.Б., Сафин А.М., Сергеев Д.И. Проблемные вопросы и направления совершенствования средств обеспечения промышленной чистоты жидкостных систем машинотехнических изделий // Национальные приоритеты России. Сер. Наука и военная безопасность. 2016. № 1 (4). С. 130 - 138.
7. Наркевич А.В., Кровяков В.Б., Коротеев А.Ю. Контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов летательных аппаратов // Труды ЦНИИ ВВС МО РФ. 2017. № 100. С. 168 - 173.
8. Барышев В.И. Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел // Вестник Южно-Уральского Государственного университета. 2005. Т. 6. № 1 (41). С. 149 – 162.
9. Фимушин Е.С., Кровяков В.Б., Струков С.Ю. и др. Проблемные вопросы контроля промышленной чистоты рабочих полостей жидкостных систем летательных аппаратов и средств наземного обслуживания // II Всероссийская научно-техническая конференция «Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств технического обслуживания летательных аппаратов». Сборник трудов. ВУНЦ ВВС «ВВА», 15 – 16 марта 2016, С. 234 – 237.
10. Барышев В.И. Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2005. №1 (41). С 149-161.

11. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. - М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
12. 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.
13. Корнилин Д.В., Кудрявцев И.А., Логвинов Л.М. Автоматический счетчик частиц загрязнений жидкости гидравлического оборудования с цифровой обработкой сигнала // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. 2007. № 1 (12). С. 178 - 181.
14. Kudryavtsev I.A. Bondar M.V., Belokonov I.V. Problems of Navigational Support of a Tether System Deployment by an Example of the YES2 Experiment aboard Foton-M3 // Gyroscopy and Navigation Pleiades Publishing, 2010, vol. 1, no. 4. С. 341 - 349.
15. Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А., Кровяков В.Б. и др. Повышение боеготовности воздушных судов за счет улучшения контроля чистоты рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов летательных аппаратов // Международная военно-научная конференция «Актуальные проблемы вооруженной борьбы Войск (Коллективных сил) Организации Договора о коллективной безопасности в воздушно-космической сфере». Сборник научных трудов. ВУНЦ ВВС «ВВА», 29-30 сентября 2016, С. 309 - 313.
16. Контроль объекта аналитический. Термины и определения. ГОСТ Р 52361-2005.- М.: Изд-во стандартов, 2006. - 12 с.
17. Карпенко О.Н., Кровяков В.Б., Мороз Т.С. Вопросы контроля загрязненности рабочих полостей жидкостных систем авиационной техники // Труды IX

международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2016». Том II. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, 2016, С. 155 – 157.

18. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб. ГОСТ 2517-2012 32. –М.: Изд-во стандартов, 2014. С. 21 – 23.

19. Романов А.А., Коротеев А.Ю., Фимушин Е.С. и др. Повышение боеготовности воздушных судов за счет улучшения контроля чистоты рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов // Международная военно-научная конференция «Актуальные проблемы вооруженной борьбы Войск (Коллективных сил) Организации Договора о коллективной безопасности в воздушно-космической сфере». Сборник научных трудов. ВУНЦ ВВС «ВВА», 29 – 30 сентября 2016, С. 309 - 313.

20. Устройство для отбора проб жидкости. Патент № 171725 РФ / Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) / Кровяков В.Б., Степанов Р.Н., Романов А.А. [и др.]. Заявка № 2016143321 от 02.11.2016. Бюл № 17, 13.06.2017, 5 с.

21. Кровяков В.Б. Кожевников И.А. Андреев М.В. Повышение достоверности контроля чистоты рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов. Авиакосмические технологии – 2017 // Труды XVII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. – Воронеж, 2017. – 361 с.