

УДК 621.7.024.2

Проблемные вопросы организации неустановившихся режимов течения жидкости при очистке полостей жидкостных систем

Кровяков В.Б.*, **Короленко В.В.****, **Степанов Р.Н.*****,
Грешнов А.С.****, **Рачков П.В.*******

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), ВУНЦ ВВС «ВВА», ул. Старых Большевиков, 54 А, Воронеж, 394064, Россия.

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

***e-mail: vkmts@yandex.ru*

****e-mail: ramon90@bk.ru*

*****e-mail: sergeig1@mail.ru*

******e-mail: Pa9sha@yandex.ru*

Аннотация

Работа посвящена проблемам обеспечения промышленной чистоты рабочих полостей жидкостных систем воздушных судов, как существенной составляющей обеспечения надежности авиационной техники и безопасности полетов. Представлен метод организации неустановившихся режимов течения жидкости, повышающий эффективность технологических процессов промывки.

Ключевые слова: промывка, очистка, неустановившийся режим течения, промышленная чистота, рабочая полость, жидкостная система.

Введение

Обеспечение надежности авиационной техники в составе обеспечения надежности авиационной системы посредством осуществления технических мероприятий является важной составляющей деятельности по обеспечению безопасности полетов воздушных судов (ВС) [1, 2]. При этом установлено, что отказы авиационной техники и технических элементов систем обеспечения полетов относятся к 98 % авиационных происшествий и инцидентов, происходящих по известным (профилактируемым) факторам [3]. В России же начиная с 2011-2012 гг. проявилась тенденция роста доли отказов авиационной техники в причинах авиационных событий [4].

Существенная часть отказов и неисправностей ВС приходится на жидкостно-газовые системы и агрегаты (ЖСА). В общем числе отказов и неисправностей, повлекших катастрофы, авиационные происшествия и авиационные инциденты, доля неисправностей и отказов ЖСА и связанных с ними ошибок экипажа составляет до 45-65 %.

Обобщение результатов исследований причин отказов ЖСА ВС показывает, что причиной отказов агрегатов жидкостных систем в 50–90 % случаев и отказов газотурбинных двигателей в 50 % случаев является повышенная (ненормативная) загрязненность рабочих (внутренних) полостей ЖСА различными посторонними частицами [5, 6]. Полученные результаты имеют большую сходимость с результатами исследований специалистов министерства авиационной промышленности и министерства гражданской авиации СССР по состоянию на 1950-1970 гг. [7, 8]. То есть зависимость надежности ЖСА ВС от загрязненности их

рабочих полостей в течении длительного времени практически не претерпевает изменений, что определяется не столько отсутствием работ по совершенствованию механизмов обеспечения промышленной чистоты (ПЧ), сколько опережающим развитием и функциональным совершенствованием самих ЖСА.

Следует отметить, что зависимость надежности ВС в целом от надежности их ЖСА имеет тенденцию к некоторому уменьшению, что определяется насыщением конструкции ВС современным электрическим, навигационным оборудованием, средствами радиоэлектронной борьбы и пр., имеющими свою историю отказов и неисправностей.

Тем не менее, отказы и неисправности ЖСА ВС наиболее часто проявляются в полете [9] и поэтому в большой степени определяют безопасность полетов, что определяет актуальность исследований в области совершенствования методов и средств очистки их рабочих полостей.

Выбор оптимального метода очистки рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов

Специалистами ВУНЦ ВВС «ВВА» выполнен анализ методов очистки внутренних полостей ЖСА разного вида технических изделий из разных отраслей промышленности, применяемых в реальных производственных условиях и находящихся в стадии разработки на уровне экспериментально апробированных или оставшихся в виде запатентованных технических решений.

Критерии выбора из них оптимальных применительно к собранным ЖСА ВС и их элементам, характеризующимся сложной пространственной геометрией и

большой протяженностью рабочих полостей, повышенными в сравнении с другими видами машинотехнических изделий требованиями к ПЧ были следующие:

возможность применения с учетом особенностей ЖСА ВС к собранным системам и их неразборным элементам;

эффективность по достигаемому качеству очистки при наличии существующей тенденции к усложнению конструкции ЖСА, минимизации зазоров в прецизионных золотниковых и плунжерных парах и повышению требований к чистоте внутренних полостей;

эффективность по продолжительности процесса очистки;

минимизация подготовительных и заключительных работ при осуществлении процесса очистки;

возможность эффективного использования в качестве моющей рабочей для очищаемого объекта жидкости;

возможность при возникновении необходимости комбинирования с другими известными эффективными методами очистки без существенных материальных затрат на преобразование выбранного метода очистки.

Определено, что в наибольшей степени перечисленным критериям соответствуют гидродинамические методы, а среди них метод промывки с организацией неустановившихся режимов течения жидкости в оптимальных для каждого объекта очистки режимах прокачки.

При организации неустановившегося режима течения жидкости существенно возрастают пристенные скорости потока в сравнении с прокачкой ламинарным или турбулентным потоком жидкости, организованным увеличением ее расхода, что

приводит к явлениям, положительно влияющим на процесс отрыва частиц загрязнений от внутренних поверхностей объекта очистки и их транспортировку за пределы очищаемого объекта [10].

Организация неустановившихся режимов течения жидкости периодическим перекрытием проходного сечения

В полостях проточных объектов очистки на практике неустановившийся режим течения жидкости реализуют периодическим перекрытием проходного сечения на входе или выходе (для создания колебаний давления жидкости) [11, 12]. При этом эффективность процессов очистки определяется величиной максимального значения давления жидкости, ограниченного допустимыми эксплуатационными (и разрушающими) значениями для конкретных объектов очистки.

Все мероприятия, направленные на очистку ЖСА (и ее интенсификацию) связаны с энергетическими затратами. Следовательно, конструктивные особенности ЖСА, препятствующие их эффективной очистке, следует рассматривать с позиции влияния этих особенностей на затраченную энергию, на ее распространение по очищаемым магистралям.

Представляется, что потери затраченной на очистку энергии в общем виде можно выразить через гидравлические потери, ибо причины, вызывающие эти потери при прокачке через очищаемое изделие жидкости, в той или иной мере препятствуют осуществлению практически всех существующих способов очистки.

Потери энергии (падение давления δP) в трубопроводной системе описывается известной формулой Вейсбаха-Дарси [13]:

$$\delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{L}{D_r},$$

где ξ - суммарный коэффициент местных сопротивлений;

$\frac{\rho \cdot V^2}{2}$ - скоростной напор; L - длина трубопровода до рассматриваемого сечения;

D_r - гидравлический диаметр трубопровода.

Из приведенной формулы следует, что наличие конструктивных особенностей, определяющих местные гидравлические сопротивления, общая протяженность полостей объекта очистки, свойства используемой для очистки жидкости, начально заданные условия подачи жидкости в систему, определяют с какой эффективностью будет осуществляться гидродинамическое воздействие на загрязнитель внутренних полостей очищаемой системы, расположенный на удалении от источника колебаний давления жидкости.

Задаваясь параметрами применяемых режимов очистки, нельзя превышать допустимые конструкцией ЖСА значения, поэтому изначально оптимизация режимов очистки ограничена этими допускаемыми (или еще жестче - эксплуатационными) значениями. А учитывая способность систем и агрегатов гасить затраченную энергию по мере продвижения по очищаемым магистралям, понижение допустимых величин давления и расхода ЖСА повышает сложность их очистки.

Помимо допустимого давления, значительно снижают эффективность всех методов очистки (или делают невозможным применение некоторых методов)

шероховатость очищаемой поверхности; применение в конструкции мягких или упругих материалов, характерные конструктивные особенности ЖСА: её форма; наличие замкнутых полостей; всевозможные повороты очищаемых магистралей; резкие перепады проходного сечения; прямые и обратные разветвления; заполнение проходных каналов конструктивными элементами; сложное пространственное взаиморасположение магистралей, ограничивающее доступ к их отдельным участкам и пр.

Большое число ЖСА ВС, характеризуются эксплуатационными давлениями, в пределах которых невозможно традиционными методами реализовать эффективные режимы гидродинамической очистки, в других ЖСА затруднительно сделать это по указанным выше причинам с должной эффективностью. Даже если на участках очищаемого объекта, близлежащих к источнику колебаний (прерывателю потока жидкости) возможно сформировать нестационарный поток жидкости с амплитудно-частотными характеристиками, удовлетворяющими требованиям эффективной очистки, то по мере удаления от источника колебаний его эффективность уменьшается вплоть до полного исчезновения. На графике (рисунок 1) условно показано распространение созданных колебаний давления жидкости. Если принять, что поток с амплитудой колебаний давления $\Delta P_{эфф.}$ является эффективным для очистки системы на всем ее протяжении, то для реализации этих параметров в самом удаленном от источника колебаний участке системы необходимо задать начальное значение амплитуды колебаний $\Delta P_{нач.} \gg \Delta P_{эфф.}$, зачастую превышающее по максимальному значению амплитуды колебаний рабочее давление $P_{раб.}$.

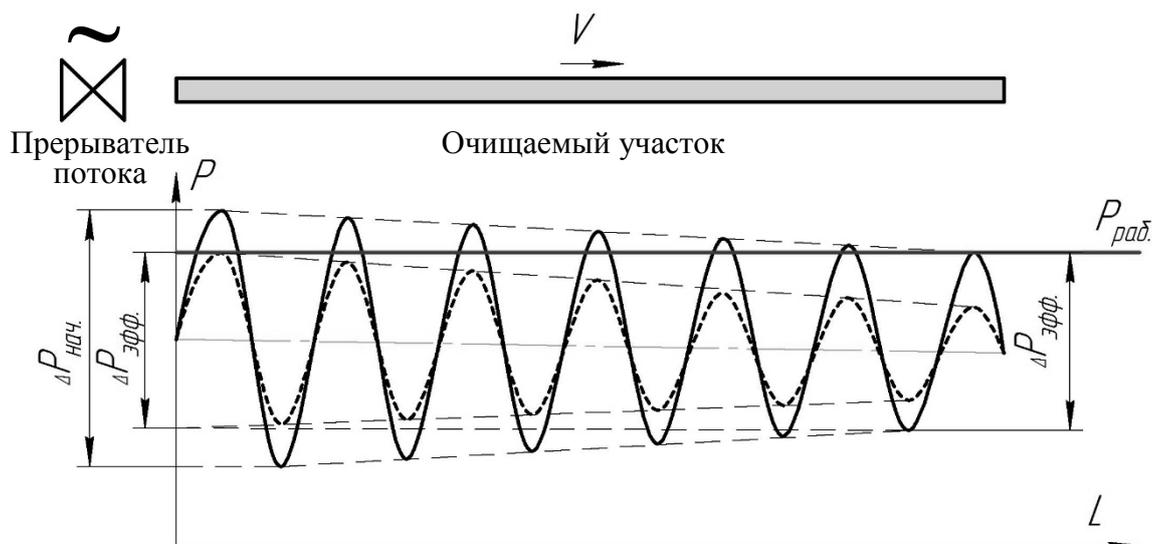


Рисунок 1 – Уменьшение амплитуды колебаний давления по мере удаления от источника колебаний

Для протяженных трубопроводных систем ВС на практике методы гидродинамической очистки с организацией неустановившихся режимов течения жидкости применяется к отдельным ее участкам, для чего производится членение системы на технологические промывочные кольца оптимальной для эффективной очистки длины с исключением из них функциональных агрегатов.

Исходя из сказанного, повышение эффективности использования неустановившихся режимов течения жидкости для очистки рабочих полостей ЖСА видится в двух направлениях:

создание условий, при которых ЖСА могут быть подвергнуты очистке потоком жидкости с оптимальными (эффективными) режимами без привязки к эксплуатационным и прочностным характеристикам объекта очистки;

изыскание новых методов организации высокоэффективных с точки зрения очистки неустановившихся режимов течения жидкости.

Организация неустановившихся режимов течения жидкости периодическим изменением ее расхода через объект очистки

Поскольку определяющим ограничением применения для очистки систем эффективных режимов нестационарных потоков жидкости является величина амплитуды колебаний давления и его максимальное значение, рассмотрена возможность организации неустановившегося потока изменением скорости в пределах постоянного давления, не превышающего эксплуатационного для очищаемой системы.

Для участка трубопровода, представленного на рисунке 2, выражающее закон сохранения энергии уравнение Бернулли для потока жидкости при неустановившемся движении имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{\text{пот}} + h_{\text{ин}},$$

где: z_1, z_2 – расстояние от произвольно выбранной горизонтальной плоскости до центра тяжести рассматриваемых сечений 1,2; p_1, p_2 – давление в центрах сечений; V_1, V_2 – средние скорости жидкости в сечении 1 и 2; ρ_1, ρ_2 – плотность жидкости на входе и выходе; g – ускорение силы тяжести; α – коэффициент Кориолиса; $h_{\text{пот}}$ – потери напора при неустановившемся движении на участке между сечениями 1-1 и 2-2; $h_{\text{ин}}$ – инерционный напор.

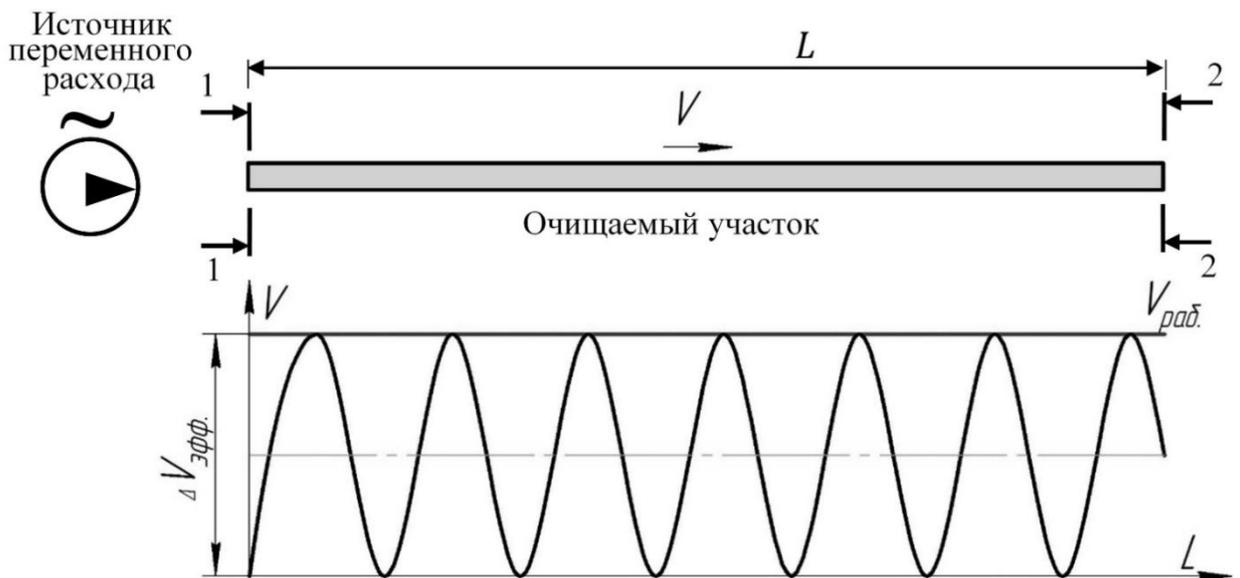


Рисунок 2 – Распространение амплитуды колебаний скорости жидкости по длине очищаемого участка

Это уравнение отличается от уравнения для установившегося потока наличием пятого члена – инерционного напора:

$$h_{ин} = \alpha' \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} ,$$

где α' – коэффициент Буссинекса (коэффициент количества движения); dV/dt – градиент скорости; L – длина рассматриваемого участка трубопровода; g – ускорение силы тяжести.

Инерционный напор не является мерой дополнительных потерь энергии и выражает ее обратимые преобразования [14], что позволяет в практических расчетах сложных гидравлических устройств не учитывать эту составляющую при определении потерь удельной энергии, принимая их равными при установившемся и при неустановившемся движении жидкости без последствий для функциональных

свойств создаваемых устройств. Из сказанного с большой долей достоверности можно сделать вывод, что манипуляции, производимые с расходными (скоростными) показателями потока жидкости на входе в рассматриваемый участок прямого с постоянным сечением трубопровода распространяются без каких-либо существенных изменений по всей его длине (в отличие от манипуляций с давлением жидкости, рисунок 2).

Сделанные в результате исследований выводы привели к разработке технологии гидроимпульсной очистки [15], суть которой состоит в том, что неустановившийся режим течения жидкости создает 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 [16].

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 моющей жидкости достигается максимально возможная амплитуда колебаний скорости, которая и определяет факторы, влияющие на интенсивность отрыва и выноса загрязнений (известно, что эффективность очистки внутренних полостей изделий несущественно зависит от давления моющей жидкости [12], т.е. ранее колебания давления создавались с целью создания колебаний скорости). В результате обеспечивается максимальная очищающая способность потока для

конкретного очищаемого изделия. При этом неустановившийся режим течения моющей жидкости, организованный по разработанному способу, сохраняет свою максимальную очищающую способность во всех участках очищаемой полости, поскольку организованные на входе колебания скорости жидкости претерпевают ничтожно малые изменения по мере продвижения по полости изделия вплоть до выхода из него (см. рисунок 2).

Очистку по предложенному методу производят при давлении, не превышающем эксплуатационного. Интенсивность колебаний давления, возникающих при периодическом изменении скорости жидкости, определяется лишь величиной местных гидравлических сопротивлений участков очищаемого изделия и, при условии заданного давления в пределах эксплуатационного, по своему максимальному значению не превышает разрушающего для изделия давления.

На рисунке 3 представлена принципиальная схема установки для реализации предложенного метода. Установка включает расходный бак для моющей жидкости 1, насосный агрегат 2, установленное в напорной магистрали насоса разработанное устройство 3 для перераспределения расхода моющей жидкости [17, 18, 19], конструктивно характеризующееся возможностью попеременного сообщения входного канала с одним из двух выходных без перекрытия проходного сечения для устройства в целом. Очищаемые полые изделия 4 и 5 подключены каждое к одному из выходных каналов устройства 3. При отсутствии необходимости очистки 2-х изделий одновременно один из выходных каналов устройства 3 соединяют со сливом в расходный бак.

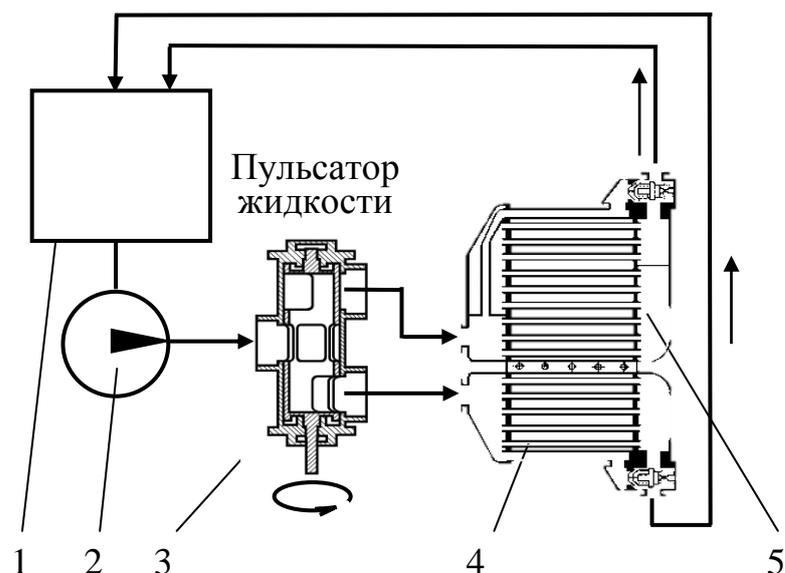


Рисунок 3 – Схема реализации технологии промывки
с периодическим изменением расхода жидкости

Установка работает следующим образом. Моющую жидкость из бака 1 с помощью насоса 2 с заданным расходом подают на вход устройства 3. Устройство 3 перераспределяет поток 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. Из выходных каналов устройства 3 поток жидкости попеременно направляется в очищаемые полые изделия 4 и 5 и далее в бак 1. Таким образом, в каждом из очищаемых изделий 4 и 5 расход жидкости попеременно изменяется от 0 до установленного значения. Это создает в очищаемых полостях изделий 4, 5 неустановившийся режим течения моющей жидкости, характеризующийся периодическим изменением

скорости в максимально возможном, установленном насосом 2, диапазоне, придавая ему максимальную для изделия очищающую способность.

Разработанная гидроимпульсная технология интенсифицирует процесс очистки полых изделий, существенно сокращая его продолжительность и обеспечивая качество, недостижимое другими методами очистки. При этом в качестве моющей жидкости используется рабочая для очищаемого объекта жидкость при давлении, существенно более низком, нежели рабочее.

Технология изначально разрабатывалась для использования в производственных условиях авиастроительных и авиаремонтных предприятий авиапрома и гражданской авиации, была существенно доработана и успешно реализована на объектах других отраслей промышленности [20].

Выводы

Разработка высокоэффективных методов и средств обеспечения ПЧ ЖСА до требуемого соответствующими нормативными документами уровня чистоты [21, 22] на основе организации неустановившихся режимов течения жидкости, позволяющих превосходить установленные нормативные требования, в условиях невозможности применения для сложных систем объективных методов контроля загрязненности внутренних полостей, с большой долей вероятности повышает возможность достижения (гарантирует) именно требуемого уровня, что приобретает актуальность в имеющейся тенденции увеличения рабочих давлений гидроприводов ВС и связанной с этим минимизацией зазоров прецизионных пар их агрегатов. Кроме этого позволяет добиться экономии ресурсов за счет повышения

долговечности агрегатов, приводов и систем; снижения времени простоев и уменьшения расходования материалов из-за отказов агрегатов; повышения энергетической эффективности агрегатов ЖСА за счет предотвращения чрезмерного снижения энергетических характеристик агрегатов по сравнению с номинальными. Введение высокоэффективных технологий очистки ЖСА в систему планового профилактического обслуживания ВС способствует поддержанию требуемого уровня их работоспособности при длительной эксплуатации и реализации стратегии минимального аварийного восстановления [23].

По результатам выполненных в области организации неустановившихся режимов течения жидкости исследований разработаны технические решения методов и средств обеспечения промышленной чистоты жидкостных систем и агрегатов, защищенные патентами РФ № 2552450 на изобретение «Способ очистки полых изделий», № 1149062 на изобретение «Генератор колебаний жидкости», № 132846 на полезную модель «Генератор колебаний жидкости», № 102559 на промышленный образец «Установка для промывки рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов».

Библиографический список

1. Руководство по предотвращению летных происшествий в авиации Вооруженных Сил СССР (РПЛП-90). – М.: Воениздат, 1990. - 214 с. URL: <http://czechlife.ru/rukovodstvo-po-predotvrascheniyu-letnyh-proissheshtviy-v-aviacii-vooruzhennyh-sil-sssr/>

2. Руководство по предотвращению авиационных происшествий с государственными воздушными судами в Российской Федерации (РПАП-2002) /Утверждено приказом МО РФ 2002 г. № 390. – М.: Воениздат, 2003. - 368 с. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/84997>
3. Байнетов С.Д. Проблемы безопасности полетов // Воздушно-космическая оборона. 2009. № 2 (45). URL: <http://militaryarticle.ru/voenno-kosmicheskaya-oborona/2009/12581-problemy-bezopasnosti-poletov>
4. Байнетов С.Д. Главная задача – безопасность полетов // Авиа-Союз. 2017. URL: <http://www.aex.ru/fdocs/2/2017/5/12/28293/>.
5. Кровяков В.Б., Попов А.В., Коротеев А.Ю. и др. Влияние промышленной чистоты рабочих полостей жидкостных систем воздушных судов на безопасность полетов // Авиационная промышленность. 2017. № 2. С. 26.
6. Никитин Г.А., Чирков С.В. Влияние загрязненности на надежность работы гидравлических систем летательных аппаратов. - М.: Транспорт, 1969. - 138 с.
7. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. - М.: Машиностроение, 1982. - 224 с.
8. Тимиркеев Р.Г., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. - 152 с.
9. Байнетов С.Д. Современный взгляд на формирование концепции безопасности полетов авиации Вооруженных Сил Российской Федерации // Авиапанорама. 2016. №4 (118). 2016, URL: <http://aviapanorama.ru/2016/08/sovremennyj-vzglyad-na-formirovanie-koncepcii-bezopasnosti-poletov-aviacii-vooruzhennyx-sil-rossijskoj-federacii>

10. 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.
11. 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.
12. Сапожников В.М. Монтаж и испытание гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1979. - 256 с.
13. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применения на летательных аппаратах. - М. Машиностроение, 1967. - 265 с.
14. Ворожцов О.В. Гидравлика с примерами решения задач. - Псков: ПГПИ, 2008. - 137 с.
15. Кровяков В.Б., Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А. и др. Гидроимпульсная очистка и контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75588>
16. Кровяков В.Б. Способ очистки полых изделий. Патент РФ № 2552450. 2015. URL: <http://www.findpatent.ru/patent>
17. Кровяков В.Б., Бирюков М.И. Генератор колебаний жидкости. Патент РФ № 132846. 2013. URL: <http://poleznayamodel.ru/model/13/132846.html>
18. Кровяков В.Б., Кровякова И.Е. Генератор колебаний жидкости. Патент РФ № 1149062. 1993. 6 с. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet.

19. Кровяков В.Б., Короленко В.В. Установка для промывки рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов. Патент РФ № 102559. 2017. 5 с. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet.
20. 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.
21. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. ГОСТ 17216-2001. - М.: Госстандарт, 2003. - 8 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200028882>
22. Чистота промышленная. Установление норм промышленной чистоты при разработке, производстве и эксплуатации продукции. ГОСТ Р 51610-2000. - М.: Госстандарт, 2001. - 6 с. URL: <http://gostexpert.ru/gost/gost-51610-2000>
23. Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д. Нормирование ресурса технических систем с учетом планового профилактического обслуживания, аварийных и плановых замен // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36457>