На правах рукописи

КОРОЛЕВ Александр Николаевич

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОПЕРАЦИОННОЙ ПРОМЫВКИ

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждение высшего образования «Московском государственном техническом университете имени Н.Э Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им.Н.Э.Баумана)

Научный руководитель: **Владимир Алексеевич Тарасов**
доктор технических наук,
профессор кафедры "Технологии ракетно-космического машиностроения" национального исследовательского университета МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Ерофеев Михали Николаевич**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории цифровых методов управления жизненным циклом изделий машиностроения ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

Кожус Ольга Геннадьевна
кандидат технических наук, начальник управления научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орел

Ведущая организация: АО «Композит», Королев

Защита диссертации состоится «__» _____ 2026 г. в _____ на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.,стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок +7 (499) 263-66-33 *3628

Автореферат разослан « __ » _____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент Богданов А.В.

Актуальность работы. Технология промывки является необходимой операцией выполнения многих технологических процессов машиностроительного производства, которая определяет качество и надежность будущего изделия. С помощью промывки осуществляется очистка деталей от технологических сред и загрязнений, в том числе от остатков СОЖ, химических реагентов, стружки, удаляются консерванты, проводится подготовка поверхностей полуфабрикатов для выполнения последующих технологических операций.

Очистка изделий (в основном промывка) и подготовка поверхности в некоторых областях достигает 10% от трудоемкости изготовления изделия. Повышение производительности и снижение себестоимости можно достичь за счет интенсификации операций промывки деталей.

Анализ используемого оборудования и действующих технологий промывки показывает:

- низкую производительность;
- невысокую степень автоматизации и механизации;
- нарушение режимов промывных операций;
- экологическое несовершенство;
- отсутствие стоимостного анализа используемых систем промывки и др.

Перечисленные причины не позволяют добиться высокого качества подготовки поверхности и низкой себестоимости.

Интенсивность водопотребления может достигать 4 $м^3$ на 1 $м^2$ с образованием жидких отходов до 1 $м^3$ на 1 $м^2$ (характерно для гальванического производства), что в масштабах страны приводит к образованию большого объема сточных вод (до 10 млн. $м^3$ в год) с малой концентрацией ионов и солей тяжелых металлов, безвозвратно теряемых (тысячи тонн цветных металлов) в процессах обработки сточных вод на централизованных очистных сооружениях. Их обработка, учитывая малую концентрацию ионов и солей тяжелых металлов (в основном, от 0,01 до 0,1 г/л), является малоэффективной.

Поскольку только в России десятки тысяч предприятий используют промывку деталей, то проблему промывки деталей следует считать актуальной.

Цель работы методическое обеспечение конструктивно – технологической разработки операционных модулей промывки поверхностей деталей с минимальными затратами.

Основными задачами исследования являются:

1. Установление функциональных связей между интенсивностями очистки поверхностей от загрязнений и технологическими режимами модуля промывки, что необходимо для выбора скорости и диаметра струй, скорости их подачи относительно деталей и минимального времени экспозиции.
2. Согласование требований к концентрациям отмываемого раствора на поверхностях деталей и в баках в зависимости от гидромеханических и геометрических параметров модуля.

3. Разработка методики выбора технологических параметров операционного модуля.

Научной новизной обладают следующие положения работы:

1. Математическое описание системы распределённой промывки на основе моделирования взаимосвязи количества загрязнений на поверхностях деталей и их накопление в баках с отмывающим раствором.
2. Аналитические соотношения, описывающие изменение толщины отмываемого загрязнения после основной обработки на всех ступенях промывки. Для стадии подъема детали из процессной ванны модель связывает толщину поднимаемого слоя, скорость подъема и вязкость электролита. Для стадии промывки погружением модель определяет связь интенсивности диффузионной промывки с коэффициентом диффузии и толщиной электролита. отмываемого загрязнения. Для стадии струйной промывки модель связывает интенсивность струйной промывки с технологическими режимами процесса.
3. Выявленные на основе численного эксперимента физические закономерности промывки глухих и резьбовых отверстий, устанавливающие связь длительности промывки с кинематическими и гидродинамическими параметрами установки.
4. Математическое обеспечение выбора технологических параметров для операционного модуля с распределенной многоступенчатой струйной противоточной промывки деталей в бессточном режиме на подвесках.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработанные модели струйно-динамической промывки позволяют определить экспозицию сложнопрофильных деталей для достижения требуемой степени очистки и назначать режимы для проведения технологической операции промывки.
2. Установленные закономерности изменения концентраций загрязнений во времени позволяют планировать цикличность работы модулей промывки. Использование зависимостей изменения концентрации растворов в баках обеспечивает при проектировании операций промывки требуемое по технологии качество очистки поверхностей деталей различной группы сложности при минимальных затратах моющей жидкости, времени промывки и производственных площадей.
3. Разработанные методики позволяют оптимизировать геометрические и динамические характеристики операционных модулей промывки с учетом габаритных размеров объектов промывки, расходов на электроэнергию и обслуживание производственных площадей. На основе теоретических и экспериментальных результатов разработана методика назначения режимов для проведения технологической операции промывки.

Практическая значимость научных, методических и технологических разработок подтверждается актами внедрения методики проведения технологической операции в организациях: ООО НПП «Гидриатика», Пензенский государственный университет, НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научно-практические положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность физико-математических моделей изменения толщины отмываемого загрязнения после основной обработки на всех ступенях промывки. При подъеме детали из процессной ванны, модель связывает толщину поднимаемого слоя, скорость подъема и вязкость электролита. При промывке погружением модель определяет связь интенсивности диффузионной промывки с коэффициентом диффузии и толщиной отмываемого загрязнения (электролита). Модель проникания струи в пограничный слой связывает интенсивность струйной промывки с технологическими параметрами.
2. Теоретическое обоснование взаимосвязи между количеством загрязнений на поверхностях деталей и их накоплением в баках с отмывающим раствором.
3. Зависимости остаточных загрязнений при струйно-динамической промывки глухих и резьбовых отверстий, от соотношения диаметров отверстий и струй с учетом кинематических и гидродинамических параметров установки.
4. Методика выбора режимов струйно-динамической промывки деталей и структура проведения технологической операции промывки.
5. Практические рекомендации по выбору технологических параметров при проектировании операционного модуля.

Методы исследований. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на научных положениях технологии машиностроения, аналитических методах описания технологических процессов, методе численного моделирования операций струйной промывки сложнопрофильных поверхностей.

Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП ФНПЦ «ПО Старт»

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, изложенных в работе, обеспечиваются корректным применением математических методов анализа и оптимизации, известных методов экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании, сходимостью результатов аналитических моделей с экспериментальными данными, а также успешным использованием основных положений работы в производстве космической техники.

Апробация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований опубликованы в 9-ти печатных работах, докладывались на 3-х Международных научно-технических конференциях. Исследования проведены в рамках проекта аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы».

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 5 статьях общим объемом 9,5 п.л., опубликованных в журналах перечней Scopus, ВАК РФ. По материалам диссертации получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Содержит 123 страницы, из которых на 106 страницах изложен основной текст, проиллюстрированный 44 рисунками и 7 таблицами. Список литературы состоит из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы сущность и актуальность темы работы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость, а также основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор, посвященный актуальным вопросам межоперационной промывки деталей. Показано, что технология промывки является необходимой операцией выполнения многих технологических процессов машиностроительного производства. После операции промывки поверхности должны удовлетворять определенным качественным характеристикам вне зависимости от сложности деталей и вида загрязнения.

Теория и практика применения межоперационной промывки деталей, основу которых составляют труды известных ученых страны, показывают тенденцию к сокращению удельного расхода воды для промывки на единицу поверхности, к внедрению многоступенчатых схем промывки, а также интерес к струйному методу промывки.

В известных работах рассматривались механические, физико-химические и термохимические методы очистки. Наибольшее распространение получили физико-химические методы: погружной метод, использующий диффузионный способ очистки загрязнений; струйный метод гидродинамического воздействия на поверхность детали, а также методы комбинированной обработки.

Вместе с этим результаты проведенных исследований недостаточны для создания технологии и оборудования малоотходной очистки, интенсификации методов промывки и повышения качества деталей.

Промывка чрезвычайно дорогостоящий процесс, который в рамках страны сопровождается потерей воды и ценных химических соединений на сумму в сотни миллиардов рублей в год. Кроме того, отходы промывки часто оказываются химически активными и нуждаются в дезактивации с помощью дорогостоящих локальных очистных сооружений. Помимо этого, проблемой является и захоронение шлама.

Представляет интерес создание бессточных, безотходных модулей промывки с замкнутым циклом, идея которого была сформулирована и опытным путем подтверждена д.т.н. А.Н. Алексеевым. Принципы создания таких модулей, можно сформулировать так:

- модуль промывки ориентирован только на одно отмываемое загрязнение (раствор химического соединения процессной ванны обезжиривания, травления, никелирования и т.д.).
- модуль может иметь несколько ступеней промывки: струйной, диффузионной, ультразвуковой, кавитационной и т.д.

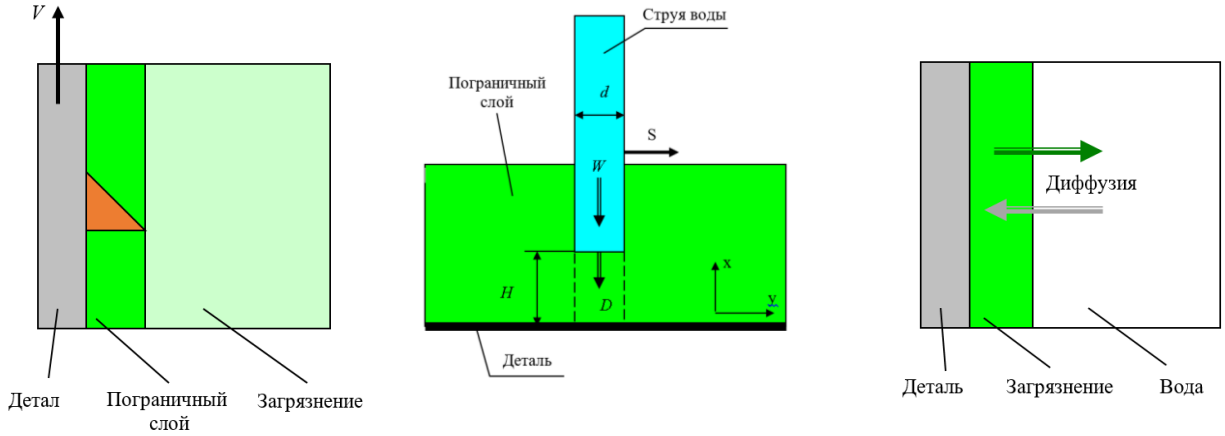
– при достижении предельно допустимой концентрации отмываемого загрязнения в отмывающем растворе в последней ступени содержимое баков с отмывающим раствором перекачивается в предыдущую ступень.
– содержимое первой ступени подвергается рекуперации, в процессе которой образующаяся технически чистая вода возвращается в бак последней ступени, концентрированный раствор отмываемого соединения возвращается в ванну основной обработки - процессную ванну.

Создание таких линий обработки невозможно без научного обоснования параметров межоперационных модулей промывки, что требует научного изучения и обобщения в виде методического обеспечения, необходимого для проведения проектных работ.

Итогом анализа первой главы работы стала формулировка задач исследований.

Во второй главе приведены экспериментально-теоретические модели взаимосвязанного протекания очистки открытых поверхностей и накопления загрязнений в баках операционного модуля промывки.

Разработаны модели изменения количества отмываемого загрязнения при выполнении технологических переходов (Рисунок 1).



а) б) в)

Рисунок 1. Расчётные схемы очистки деталей при: подъёме из ванны (а), струйной промывке (б) и промывке погружением (в); V – скорость подъема детали; d – диаметр струи; W – скорость струи; S – движение подачи; D – скорость внедрения струи в загрязнение; H - расстояние от вершины струи до отмываемой поверхности.

Для стадии подъема детали из процессной ванны гальванохимических операции модель определяет изменение толщины поднимаемого слоя загрязнения от скорости подъема, вязкости электролита и времени экспозиции (1). Вторая и третья модели (2), (3) для стадий струйной промывки и диффузионной промывки связывают изменение концентрации загрязнения с технологическими параметрами процессов

$$\delta = \delta^* e^{-\frac{gt^2}{H}\left(1-\frac{2\mu t}{3\rho\delta^{*2}}\right)} \quad (1)$$

$$C_i = C_{i-1} e^{-\alpha_{стр} t_{стр}} \quad (2)$$

$$C_i = C_{i-1} e^{-\alpha_{пог} t_{пог}} \quad (3)$$

где $\delta^* = \omega_1 \sqrt{\frac{\mu V}{g\rho}}$ – исходная толщина слоя загрязнения, $\alpha_{стр} = \frac{1}{\omega_2} \frac{\rho W^2}{\rho W^2 \delta + 2\mu + \frac{2\mu d}{\chi\delta}}$, $\alpha^*_{пог} = \frac{\omega_3 \eta}{\delta^2}$ - интенсивности струйной и диффузионной промывки; $t_{стр}$, $t_{пог}$ – время струйной и погружной промывки; ρ - плотность электролита; g - ускорение свободного падения; δ^*, δ - исходная и остаточная толщина слоя загрязнения;μ - вязкость загрязнения; η - коэффициент диффузии; ω_1, ω_2, ω_3- поправочные коэффициенты; i- индекс ступени промывки.

Для определения взаимосвязей между режимами промывки и интенсивностью промывки с учетом геометрических размеров ванн проведены экспериментальные исследования. Детали на подвесках с площадью поверхности 1 м^2 подвергались промывке. Баки с водой для промывки имели объём 0,5 м^3. Концентрация основных отмываемых компонентов электролита при обработке измерялась в отобранных из соответствующих сборников-дозаторов и баков пробах отмывающего раствора используемых ступеней промывки. При проведении исследований использовались фотометрический и электрохимический методы измерения концентраций основного отмываемого компонента

Экспериментальные исследования позволили получить данные по изменению концентрации основного отмываемого компонента по ступеням струйной промывки и промывки погружением (Рисунок 2), оценить толщину загрязнения (Рисунок 3) и определить константы интенсивности очистки отмываемого загрязнения при струйно-динамической и диффузионном методах промывки (Таблица 1).

Для операционного модуля с распределённой системой, состоящей из нескольких ступеней струйно-динамической промывки и ступени промывки погружением, разработана единая рекуррентная формула (4), связывающая окончательную концентрацию отмываемого компонента на поверхности детали после покидания операционного модуля с N ступенями струйной промывки

$$C^{\Sigma}_{N+1} = \left[\sum_{n=1}^{N} \left(K^{\Sigma}_{n-1} - K^{\Sigma}_{n} \right) \gamma^{N-n+1} \right] \beta + K^{\Sigma}_{N+1} \quad (4)$$

где N - число ступеней струйной промывки, n - номер ступени промывки, K^{Σ}_n - предельно допустимая концентрация отмываемого компонента в отмывающей

жидкости, C_{N+1}^{Σ} - результирующая концентрация отмываемой компоненты на поверхности детали.

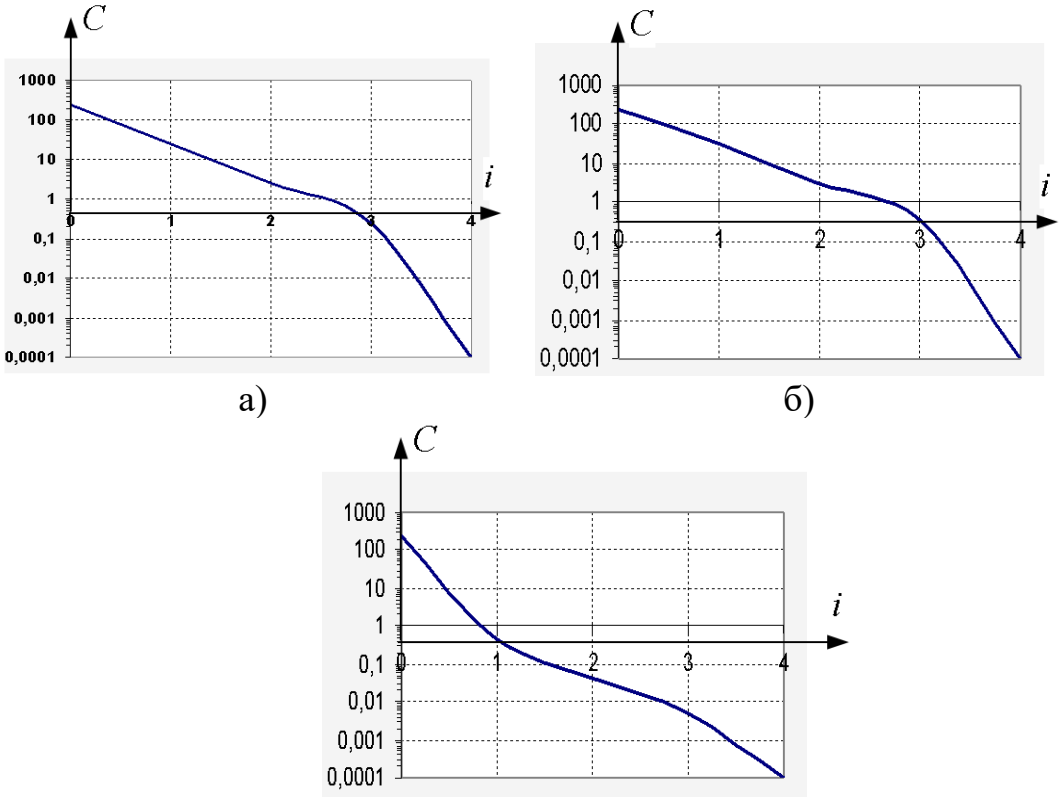


Рисунок 2. Изменение концентрации ООК по ступеням промывки: а) на деталях, б) в сборниках-дозаторах, в) в баках.

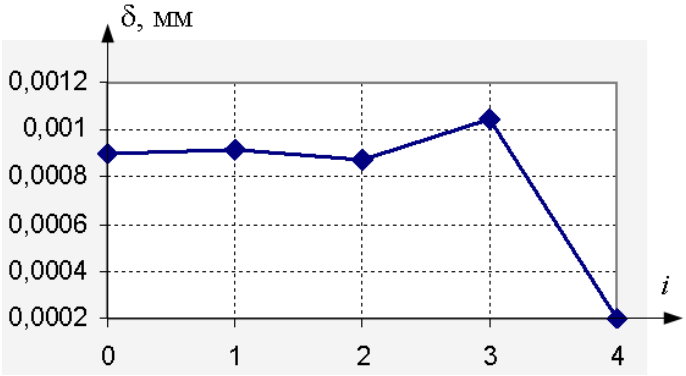


Рисунок 3. Толщина слоя основного отмываемого компонента на поверхностях деталей по ступеням промывки.

Таблица 1.

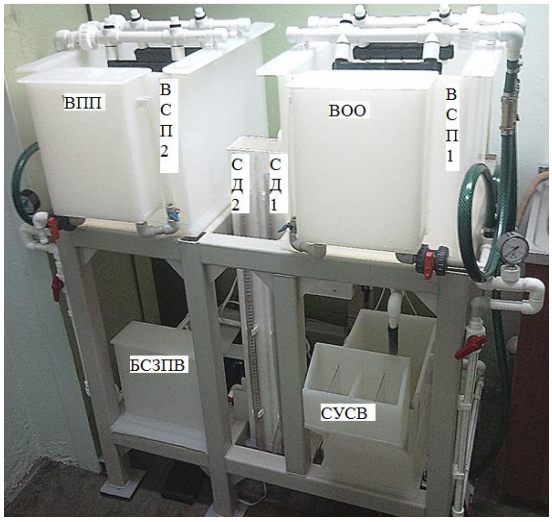
Константы интенсивности струйной и диффузионной промывки

Отмываемый раствор после операции	$\alpha_{стр}$, , $с^{-1}$	$\alpha_{пог}$, $с^{-1}$
Обезжиривания	2,3	0,205
Травления	2,3	0,219

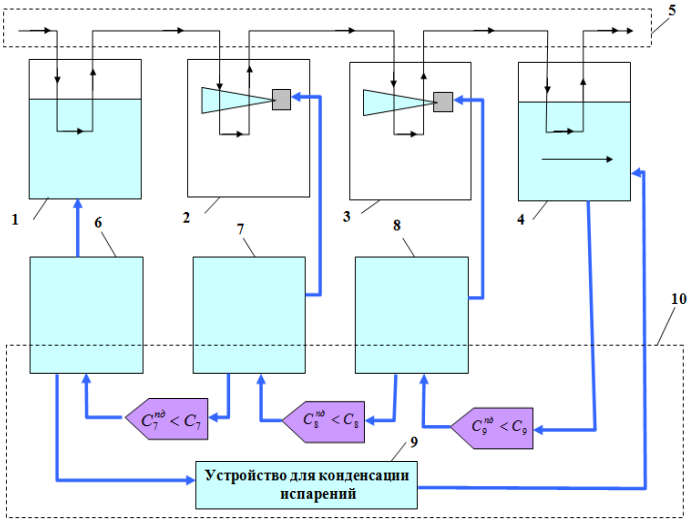
Никелирования	2,3	0,217

С целью изучения закона накопления концентрации загрязнения в баках с отмывающим раствором была построена лабораторная установка по схеме бессточного операционного модуля с противоточным движением отмывающего компонента (Рисунок 4).

Бак 1 с раствором основной обработки (ВОО), имитирует погружение в процессную ванну гальванического модуля. В ваннах 2 (ВСП1) и 3 (ВСП2) производится струйно-динамическая промывка деталей, для сокращения длительности операции. Ванна промывки погружением 4 (ВПП) предназначена для удаления остатка отмываемого компонента на основе диффузионных процессов. Каждая из ванн ВПП, ВСП1 и ВСП2 имеет баки 6, 7 и 8 для накопления отмывающего раствора (БСЗПВ). При достижении предельно допустимой концентрации отмываемого раствора в ВПП, происходит перелив в ВСП2, а затем в ВСП1. Отработанная вода после ВСП1 попадает в сборник-улавливатель сточных вод СУСВ, где с помощью кондуктометра (хлор-ионного измерителя) определяется концентрация отмываемого компонента в сточных водах. Рекуператор 9, отработанную воду из СУСВ, разделяет на технически чистую воду для ВПП и концентрированный раствор для возвращения в ВОО.



а)



б)

Рисунок 4. Лабораторная установка (а) и схема работы (б).

Для изучения процесса накопления загрязнения в баках в качестве раствора в ванне основной обработки использовался раствор поваренной соли, в качестве отмывающего раствора использовалась дистиллированная вода. На рисунке 5 представлен график изменения концентрации поваренной соли в баках ступеней промывки в виде функции промытой площади деталей. При проведении экспериментов партия деталей имела площадь отмываемой поверхности 1,2 м^2.

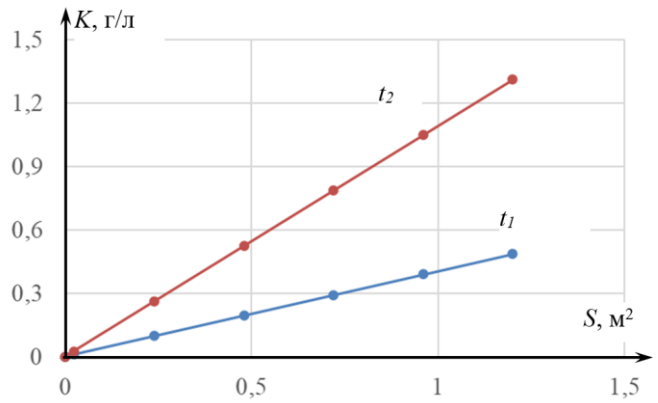


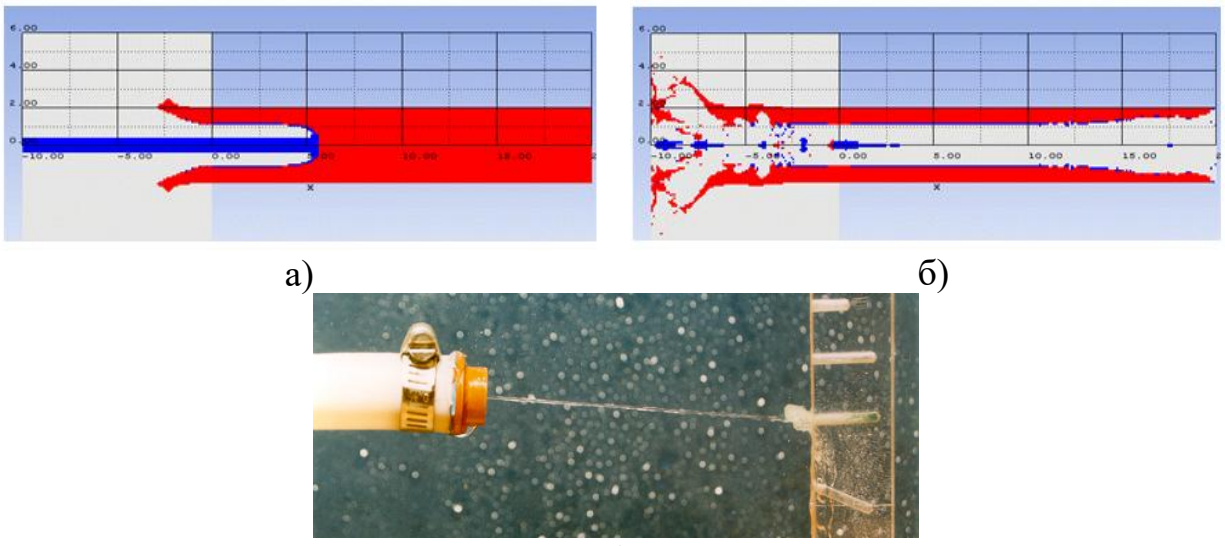
Рисунок 5. График накопления концентрации поваренной соли в баке после струйной промывки в период времени t_1=1 сек и t_2=4 сек.

В третьей главе исследована возможность промывки глухих резьбовых отверстий на подвесках.

Путем численного и экспериментального расчета показана двухстадийность процесса промывки (Рисунок 6). На первой стадии струя проникает в загрязнение в глухом отверстии, создавая каверну. На второй стадии, после достижения дна отверстия происходит вытеснение остатка загрязнения из отверстия.

Для расчета времени экспозиции получен график зависимости скорости проникания от соотношения диаметра отверстия и струи (Рисунок 7). График показывает также что непостоянство скорости определяется влиянием на процесс проникания отраженных от стенок отверстия волн возмущения.

Установлены также зависимости объема остаточного загрязнения от скорости струи и диаметра отверстия (Рисунок 8). Последнее необходимо для определения длительности диффузионной промывки.



а) б)

в)

Рисунок 6. Процесс струйной промывки: а) проникание струи в загрязнение в глухом отверстии; б) вытеснение остатка загрязнения из отверстия; в) конечный момент струйной промывки.

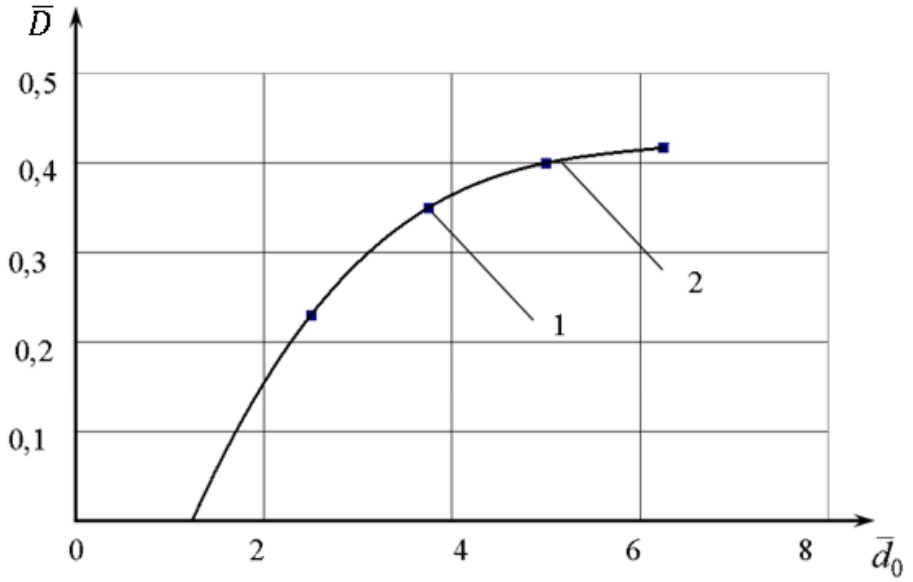


Рисунок 7. Зависимость относительной скорости $\bar{D}$ внедрения струи в загрязнение от относительного диаметра $\bar{d}_0$ отверстия: 1 – результаты численного моделирования; 2- аппроксимирующая кривая

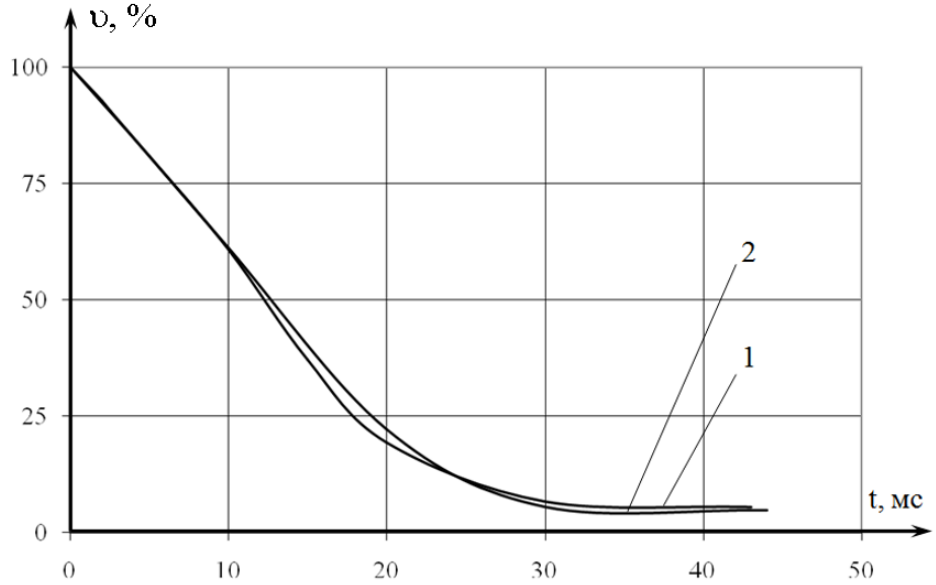


Рисунок 8. Зависимости остаточного загрязнения υ(t) от воздействия струи со скоростью истечения ν =7 м/с при диаметре отверстие d_o = 2 мм: 1 – непрерывно истекающая струя; 2 – струя конечной длины (дискретная).

В четвертой главе представлены научно-практические результаты по созданию методического обеспечения для задач разработки операционных модулей промывки и по определению режимов для технологической операции струйно-динамической промывки,

В основу разработки предложена концепция компоновки бессточного операционного модуля промывки, основанная на многоступенчатости промывки и противоточности движения отмывающей жидкости между баками ступеней с её периодической рекуперацией.

На базе минимизации затрат на очистку поверхностей деталей предложена методика выбора числа ступеней с учетом региональных особенностей производства и конъюнктуры рынка потребления электроэнергии. Её использование позволило сформулировать рекомендации, представленные на Рисунке 9.

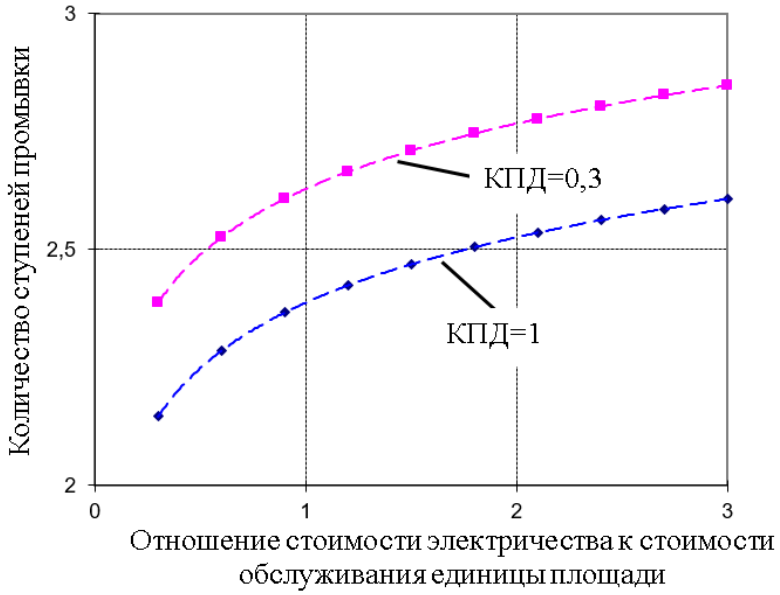


Рисунок 9. Оптимальное число ступеней промывки на операции никелирования в зависимости от соотношения затрат на обслуживание с учетом особенностей региона страны; КПД=0,3 – при загрузке операционного модуля на 30%; КПД=1 – при загрузке операционного модуля на 100%.

Эта разработка дополняется методикой выбора габаритных параметров операционных модулей промывки с учетом серийности производства, основанной на решении оптимизационной задачи снижения затрат на эксплуатацию модулей. В частности, получено соотношение для определения числа подвесок с деталями (5), которые одновременно размещаются в ванне основной обработки

$$m_{\text{под}} = \frac{\beta \Phi_2^0}{(\Phi_{\text{пл}}^{\text{н}} l_{\text{ш}} l_0 + \frac{\alpha \Phi_1^0 l_{\text{ш}}}{l_0})} \quad (5)$$

а также зависимости (6, 7, 8) для расчета рациональных габаритных размеров ванны в горизонтальной плоскости и в вертикальном направлении

$$S_{\text{бак}} = m_{\text{под}} l_{\text{ш}} l_{\text{под}} \quad (6)$$

$$l_{\text{под}} = k_1 \sqrt{S_{\text{д}}^{\text{под}}} \quad (7)$$

$$S_{\text{д}}^{\text{под}} = \frac{S_{\text{д}}^{\text{цикл}}}{m_{\text{под}}} \quad (8)$$

где $l \times l \times l_ш$ размеры детали, соответствующие длине, высоте и ширине, $S_o^{под}$ - площадь поверхности деталей на одной подвеске, $S_o^{цикл}$ -площадь поверхности деталей, проходящих одновременную обработку за один цикл оборудования, k_1 - коэффициент пропорциональности, Φ_0^0 - стоимость базового экземпляра

оборудования с размерами основного бака $l_0 \times l_0$ в горизонтальной плоскости, $\Phi_{пл}^{и}$ - затраты, связанные с обслуживанием единицы площади цеха, Φ_1^0, Φ_2^0 - коэффициенты, определяющие влияние на общие затраты фактических габаритов основного бака, α, β - весовые коэффициенты.

Сравнительная оценка затрат на промывку деталей с очистными сооружениями и без них представлена на Рисунке 10.

Определены условия перспективности использования бессточных модулей для основных операций гальванохимической обработки поверхностей деталей: никелирования, хромирования, кадмирования, а также для промежуточных операций: травления и обезжиривания.

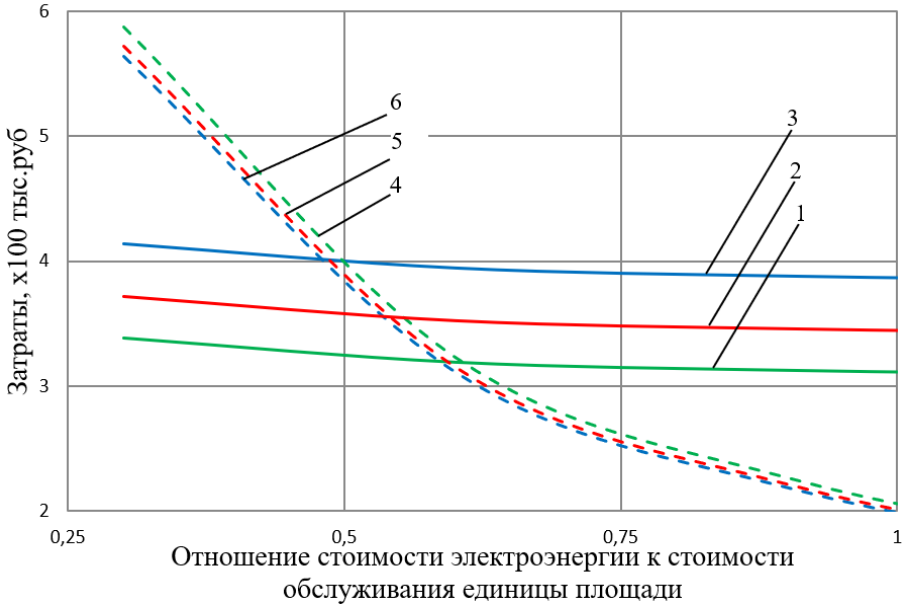


Рисунок 10. Сравнение оптимального числа ступеней промывки для технологических линий со сточными водами (1, 2, 3) и без образования сточных вод (4, 5, 6) после операций: 1, 4 -кадмирование; 2, 5 - цинкование; 3, 6 – хромирование.

Анализ показал, что использование бессточных операционных модулей промывки обеспечивает экономическую выгоду по сравнению с системами промывки, включающими очистные сооружения.

Были разработаны рекомендации на выбор мощности рекуператора, которая должна находиться в четком соответствии с площадью деталей, промываемых за год.

Апробация разработанной методики определения компоновочных параметров операционного модуля промывки на предприятие ООО «Гранит» г.Уварово, позволила спроектировать для операции хромирования и цинкования бессточные операционные модули с противоточным движением отмывающего компонента по двухрядной схеме, с учетом стоимости электроэнергии за квт/ч и аренды производственных помещений в месяц по Тамбовской области, о чем свидетельствует акт, полученный действующим предприятием.

Основные выводы:

1. Установлена связь между количеством загрязнений на поверхностях деталей и их накопление в баках с отмывающим раствором, позволяющая по требованию к чистоте поверхности деталей рассчитать длительность цикла работы операционного модуля до рекуперации воды.
2. Разработаны физико-математические модели снижения количества загрязнения на открытых поверхностях деталей, обеспечивающие обоснование длительности промывки и скорости подъема подвесок из ванн струйной промывки операционного модуля.
3. Установлена длительность промывки глухих и резьбовых отверстий, которая является сдерживающим фактором повышения производительности операционного модуля. Результаты численного эксперимента получены при варьировании соотношением диаметров отверстий и струй, а также с учетом кинематических и гидродинамических параметров установки.
4. Теоретически доказано, что отношение затрат электроэнергии на промывку к стоимости обслуживания площади цеха, занимаемого операционным модулем промывки, однозначно определяет его конструктивное решение. В частности:
   - оптимальное число ступеней струйной промывки;
   - оптимальное соотношение площади, занимаемой операционным модулем к его высоте.
5. Предложен алгоритм расчета, при проектировании операционного модуля промывки, конструктивно-технологических параметров, учитывающий серийность производства.
6. Полученные результаты были использованы при проектировании операционных модулей для предприятия ООО «Гранит» и при создании лабораторной установки для использования в учебном процессе кафедры СМ12. В результате на порядок сокращаются затраты на очистку деталей машиностроения и повышается качество очистки поверхности, что свидетельствует о достижении поставленной цели работы.

Материалы диссертации изложены в следующих основных работах:

1. Influence of the surface cleaning methods of composite products on the quality of coverings. / Korolev A.N., [et al.]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 4, 2016. P. 012015. (0,8 п.л./0,5 п.л.).
2. Технологические факторы гидроструйной очистки поверхностей деталей в операционном модуле гальванического производства / В.А.Тарасов, А.Н.Алексеев, А.С.Филимонов, А.Н.Королёв// Полёт, №12, 2009.
3. Тарасов В.А., Алексеев А.Н., Королев А.Н., Цебро Ю.А. Анализ изменения концентрации электролита в технологическом операционном модуле с многоступенчатой системой промывки деталей //Оборонная техника. -2011. -№1-2, с.

4. Способ струйной химической обработки и очистки поверхностей плоских изделий: пат. РФ № 2426820 / А.Н. Королев [и др.]; заявл. 28.12.09; опубл. 20.08.11.

5. Способ бессточной гальвонохимической обработки и очистки поверхностей деталей в перфорированных барабанах: пат. РФ № 2464364 / А.Н. Королев [и др.]; заявл. 24.12.10; опубл. 20.10.12.

6. Королев А.Н., Тарасов В.А., Боярская Р.В. Бессточная многоступенчатая промывка элементов машин от химических загрязнений. //Оборонная техника. - №1-2.С.47-51

7. Королев А.Н., Тарасов В.А., Колпаков В.И., Баскаков В.Д. Численное моделирование процесса струйно-динамической промывки деталей с глухими отверстиями. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. № 4 (98). С. 34-41.

8. Королев А.Н., Тарасов В.А., Алексеев А.Н. Повышение эффективности очистки поверхностей деталей РКТ на базе совершенствования операционных модулей с системой распределенной промывки // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XL академических чтений по космонавтике. – Москва, 2015 г. – С. 418.

9. Королев А.Н., Тарасов В.А. Функционально-стоимостной подход к обоснованию параметров модуля многоступенчатой промывки // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XL академических чтений по космонавтике. – Москва, 2023 г.