

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)
ПО ПРОГРАММЕ АСПИРАНТУРЫ

ШАВАЛЕЕВА ЭМИЛЯ ИРИКОВИЧА

**СОЗДАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

Выполнил(а):
Аспирант 4 курса очной формы
обучения
Направление подготовки
15.06.01 Машиностроение
Направленность
Машины, агрегаты и процессы

Допущено к защите и проверено на
объем заимствования:

И.о. Заведующий кафедрой
Док-р техн. Наук, проф.

Научный руководитель
К.т.н., доцент

_____ / Сайтов Р.И.

_____ / Абдеев Э.Р.

«___» _____ 2020 г.

УФА-2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Сравнительный анализ существующих технологий очистки оребранных биметаллических труб АВО и методы контроля загрязненности поверхности алюминиевых сплавов.....	5
1.1 Общие методы очистки поверхностей из алюминиевых сплавов ..	5
1.2 Способы и устройства для очистки оребренных труб	9
1.3 Сравнительный анализ методов оценки загрязненности поверхности алюминиевых сплавов	12
1.4 Выводы к первой главе	26
2. Разработка техники и технологии очистки оребренных труб в технологическом потоке производства.....	28
2.1 Узел подготовки раствора.....	32
2.2 Узел очистки оребренных труб	34
2.3 Автоматизированная система управления технологическими процессами очистки	38
2.4 Монтаж узла очистки оребренных труб.....	42
2.5 Выводы ко второй главе.....	45
3. Утилизация и регенерация отработанного моющего раствора.....	46
3.1 Исследования отработанного моющего раствора	46
3.2 Разработка технологии регенерация отработанного моющего раствора	53
3.3 Принцип работы установки	54
3.4 Технология регенерации	55
3.5 Фильтрация	56
3.6 Расчет ресурса и определение продолжительности обратной промывки	57

3.7 Обработки осадка	64
3.8 Требования к привязке	65
3.9 Приготовление реагентов.....	65
3.10 Режим работы установки	66
3.11 Выводы к третьей главе	67
4 Исследование влияния степени загрязненности оребренной трубы на интенсивность рассеяния лучистой энергии от поверхности	69
4.1 Подготовка экспериментальных образцов.....	71
4.2 Очистка образцов на экспериментальном стенде.....	72
4.3 Количественная оценка загрязненности поверхности экспериментальных образцов.....	76
4.4 Анализ экспериментальных данных	82
4.5 Выводы к четвертой главе	103
5 Исследование влияния степени загрязненности поверхности на теплоэффективность оребренной биметаллической трубы АВО.....	105
5.1 Разработка испытательного стенда экспресс анализа теплоэффективности оребренных труб.....	105
5.2 Методика проведения испытаний	107
5.3 Методика обработки экспериментальных данных.	113
5.4 Выводы к пятой главе	119
6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
7 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	123

ВВЕДЕНИЕ

Аппараты воздушного охлаждения нашли свое применение для решения огромного ряда технических задач в различных отраслях, в том числе и в нефтехимической промышленности. Охлаждение окружающим воздухом газообразных и жидких продуктов различной химической природы реализуется при помощи оребренной биметаллической трубы, которая изготавливается из несущей стальной трубы и накатанных на ней спиральных ребер из алюминиевых высокотеплопроводных сплавов АД1 и АД1М.

Энергоэффективность и качественное функционирование АВО формируется на стадии проектирования и изготовления. Одними из факторов эффективности теплопередачи оребренной трубы является загрязненность поверхности оребрения, продуктами минерального происхождения в процессе изготовления. Загрязненность поверхности трубы формируется вследствие использования при методе холодной деформации смазочно-охлаждающей жидкости.

Для обеспечения благоприятных условий пластического течения материала трубы при вытяжке ребер применяют СОЖ, которую в процессе накатки ребер подают в зону пластической вытяжки ребра. В результате оребрения, жировые загрязнения минерального и растительного происхождения (минеральные масла, консистентные смазки) а также металлические включения в виде алюминиевой стружки, покрывают поверхность оребренной трубы.

В результате загрязнения, коэффициент теплопередачи снижается в 1,5 ...2,0 раза, следовательно, снижается КПД теплообменной аппаратуры. Чтобы исключить этот фактор, следует производить очистку оребренной трубы, исключая тем самым дальнейшее ее загрязнения в аппарате и снижение коэффициента теплопередачи.

1. Сравнительный анализ существующих технологий очистки оробренных биметаллических труб АВО и методы контроля загрязненности поверхности алюминиевых сплавов

1.1 Общие методы очистки поверхностей из алюминиевых сплавов

К основным применяемым способам очистки поверхности из алюминиевых сплавов относятся механические, ультразвуковые, химические и электрохимические методы.

Механические методы, включая чистку проволочной щеткой, пескоструйную очистку, шлифование абразивным диском или наждачной бумагой, применяются для чистки и полировки поверхности. Механическая очистка с использованием ручного электроинструмента трудоемка. Автоматизированные процессы включают вибрационное полирование и пескоструйную обработку. Механическая очистка является иногда единственным способом удаления обильных загрязнений, ржавчину или окалину, но данный метод трудно реализовать для очистки оробренной трубы на этапе ее изготовления, также недостатком данного механического способа очистки является то, что не исключена возможность деформации обрабатываемой поверхности.

Ультразвуковая очистка сочетает возможности химической очистки моющим средством или растворителем с механическим воздействием ультразвуковых волн. Преобразователи, расположенные на дне или на боковых стенках емкости с чистящим раствором, генерируют ультразвуковые волны. Ультразвуковая энергия вызывает кавитационный процесс на поверхности обрабатываемой детали. Перемешивание раствора на поверхности обрабатываемой детали создает скребущее действие, которое поднимает и удаляет загрязнения с поверхности.

Для очистки оробренных труб ультразвуковым методом необходимо изготовления узла в сложном конструктивном и техническом исполнении с

применением дорогостоящего оборудования и подходит скорее для мелкогабаритных изделий. Детали, которые погружают в ультразвуковой очиститель, должны иметь хороший доступ ко всем поверхностям для того, чтобы процесс кавитации был эффективным.



Рисунок 1. Ультразвуковой очиститель

Химическая очистка может быть осуществлена, подвергая деталь опрыску жидкостью или погружению в чистящий раствор. Очиститель может быть щелочным, кислотным, нейтральным, растворяющим, или эмульсией. Выбор очистителя зависит от загрязнений, которые предстоит удалить, размера детали и типа наносимого покрытия, и материала субстрата.

Щелочные очистители являются самыми традиционными, но также существуют кислотные очистители и эмульсионные очистители, используемые для промышленных целей. Щелочные очистители имеют способность устранять широкий круг загрязнений, предотвращать повторное осаждение, обеспечивать очистку даже когда сам загрязнен, контролировать пенообразование, легко смываться и быть рентабельным.

Для очистки изделий можно применять метод опрыскивания или погружения. При опрыскивании (распылении), объединяются химические

свойства очистителя с механическим воздействием раствора, примененного под давлением.

Значения pH в растворах очистителя изменяется в зависимости от обрабатываемых деталей и субстрата материалов и обычно имеют диапазон от 4.5 до 10.5:

- щелочные очистители
 - низкий pH, 9 – 10,5
 - средний pH, 10,5 – 11,5
 - высокий pH, > 11.5
- нейтральные очистители, pH фактор 6,5 - 9
- кислотные очистители, pH фактор 1,0 – 5,5

Щелочные очистители являются самым распространенным способом удаления загрязнения для подготовки металла к нанесению порошкового покрытия. Очистители, основанные на гидроксиде натрия (каустическая сода) являются экономическими в тех случаях, когда желательна очистка омылением. Каустическая чистящая среда является весьма реактивной на поверхностях цветных металлов, и она может вызвать избыточное травление на поверхности алюминия и цинка; причем возможно образование сажи и повышение содержания цинка в чистящем растворе.

Остатки чистки каустиком также трудно смыть, особенно если температура раствора высока.

Щелочные силикаты отлично подходят для очистителей, которые используются на поверхности цветных металлов. Силикаты могут обеспечить хорошую очистку с минимальным химическим воздействием, и они эффективны при эмульгировании загрязнений. Силикаты стоят несколько больше, по сравнению со щелочами и не очень легко смываются.

Жиры растительного происхождения практически нерастворимы в воде и довольно легко растворимы в водных растворах щелочей и их солей,

поэтому наиболее оптимальным является химический способ очистки каустической содой.

Основная часть предприятий изготовителей используют традиционную устаревшую технологию, основанную на барботажном методе очистки в щелочном растворе, за счет чего в целом снижается оптимальность изготовления.

Серьезные недостатки этого метода вызваны тем, что на производстве для его реализации используют барботажные 12 метровые ванны, в которых готовят раствор.



Рисунок 2. Барботажная ванна

Моющий щелочной раствор по технологии подогревают до температуры 60 - 65 градусов по Цельсию, а его показатель pH доводят не менее чем до 12. При приготовлении раствора выделяются пары едкого натрия, что неблагоприятным образом сказывается на рабочих цеха изготовляющих оребренные трубы. Помимо этого, данная технология является энергоемкой и ресурсно-затратной, ведь после процесса накатки восьмиметровой трубы, их собирают в пучок и с помощью крана помещают в барботажную ванну на определенное время. А для поддержания температуры

раствора в пределах, требуемых по технологии, затрачивается огромное количество электроэнергии.

1.2 Способы и устройства для очистки оребренных труб

Весь процесс производства оребренной трубы содержит ряд последовательных операций, которые включают в себя: прокатку заготовки на стане холодной прокатки ребристых труб ХПРТ, очистку готовой трубы щелочным раствором, ее промывку водой и складированием на стендах. Осуществление этих операций не имеет эффективной последовательности и предполагает использование лишних трудовых, и временных ресурсов, а громоздкие барботажные ванны занимают огромное количество места в цеху. Также стоит отметить, что пары щелочного раствора отрицательно воздействуют на здоровье рабочего персонала при его испарении в закрытом цеху, что является нарушением охраны труда и техники безопасности.

В результате патентного анализа были выявлены альтернативные данному методу способы и устройства для очистки оребренных труб.

Известно устройство для мойки загрязненных конструкций, содержащее раму, моющие форсунки, которые установлены на опоре рамы, контейнер моющей жидкости, источник давления, который присоединен к контейнеру моющей жидкости и решеткам моющих форсунок и осуществляет подачу моющей жидкости к решеткам форсунок под высоким давлением, при этом моющие форсунки расположены, на, по крайней мере, двух штангах моющих струй, которые установлены на раме, причем каждая из штанг размещена с возможностью свободного колебания, относительно, по крайней мере, одной оси свободы, одна первая штанга снабжена форсункой с большим отверстием для осуществления мойки, причем труднодоступные объекты в отдаленных положениях моют с большего расстояния с использованием струй низкого давления, по крайней мере, одна вторая штанга снабжена решеткой форсунок с широким охватом, для

осуществления мойки несложных поверхностей с близкого расстояния, и, по крайней мере, несколько форсунок на каждой из штанг моющих форсунок соединены с устройством повышения давления с гидравлическим приводом с управляемой производительностью и давлением, при этом в форсунки подается моющая жидкость из устройства повышения давления с использованием или давления системы, или существенно повышенного давления [Заявка на изобретение № 98120169, кл. В08В 3/02, опубл. 2000.09.27].

Недостатком известного устройства является сложность его конструктивного исполнения.

Известно устройство для очистки длинномерного материала, содержащее корпус с камерой, имеющей внутренние стенки с каналами (отверстиями), соединяющими камеру с распределительным коллектором, соединенным с системой подачи газообразного рабочего агента (не показана). На торцах камеры установлены запорные элементы с осевым отверстием, в которых размещены выполненные в виде резонансных полостей излучатели генератора акустических колебаний, имеющего расположенное по оси камеры сопло, расширяющееся на выходных частях, связанных с полостями излучателя [Авт.свидетельство № 1480899, кл. В08В 5/04, опубл. Бюл. № 19, 32.05.89 г.].

Недостатком устройства является сложность его конструктивного исполнения.

Известен способ очистки длинномерного материала, включающий подачу рабочего агента, например сжатого воздуха, в распределительный коллектор, который через каналы проходит в камеру и устремляется к окнам и отверстиям. На выходе из камеры в окна воздушный поток достигает максимальных скоростей. Далее струя газа попадает в резонатор, и, когда давление достигает значения, равного давлению на входе резонатора, состояние газа в резонаторе становится неустойчивым, т.е. резонатор на

короткий момент времени сам становится источником газовой струи. В результате наложения акустического поля образующиеся переменные зоны разрежения и повышенного давления, как в рабочем агенте, так в жидкостной пленке, вызывают в последней кавитационные явления. При этом происходит моментальное дробление и расчленение монолитной пленки жидкости на бесчисленное количество микрочастиц [Авт. свидетельство № 1480899, кл. В08В 5/04, опубл. Бюл. № 19, 32.05.89 г.].

Недостатками способа являются сложность проведения очистки поверхности длинномерного материала и недостаточно высокая степень очистки поверхности.

Известен способ того же назначения для мойки загрязненной конструкции, включающий этапы использования в качестве моющей жидкости щелочного водного раствора и осуществления мойки поверхностей с помощью струй высокого давления моющей жидкости, при этом поверхности конструкций, которые нужно вымыть, подвергают воздействию струй высокого давления из, по крайней мере, двух различных типов форсунок, при этом труднодоступные объекты и объекты в отдаленных положениях моют с большого расстояния с помощью форсунки с большим отверстием, которая подает струю с близкого расстояния, с помощью решетки форсунок, которые выпускают струи повышенного давления, причем давлением в трубопроводе моющей жидкости, которую подают к любой из форсунок, управляют посредством устройства повышенного давления, которое соединяют с форсункой [Заявка № 98120169, кл. В08В 3/02, опубл. 2000.09.27].

Недостатками способа являются сложность его осуществления и недостаточно высокая степень очистки поверхности загрязненной конструкции.

Известно устройство для мойки оребренных труб, содержащее камеру с наклонными отверстиями в ее стенке, соединяющими камеру с

распределительным коллектором, отличающееся тем, что камера представляет собой трубу, на которой размещены распределительный коллектор с патрубком для подачи моющего раствора и патрубок для подачи воды, на стенке трубы под которыми выполнен ряд отверстий, оси этих отверстий расположены под углом 30-45° к оси трубы и под углом 45-60° между касательной к образующей поверхности трубы и вертикальной осью отверстий, при этом оси отверстий расположены симметрично относительно поперечных плоскостей, перпендикулярных оси трубы, одна из которых проходит через середину коллектора, другая - через середину патрубка ввода воды, и направлены в противоположные стороны, по всей противоположной половине трубы выполнен ряд поперечных щелевидных прорезей для отвода использованных соответственно моющего раствора и воды, кроме того, распределительный коллектор выполнен из продольной половины трубы с заглушенными торцами [Заявка: 2008109533/12, 12.03.2008, МПК В08В 5/00, опубл. 10.10.2009].

Недостатками конструкции этого устройства является: наличие дополнительной емкости для хранения моющего раствора и воды; невозможность изъятия заготовки из камеры устройства, так, как камера представляет собой неразборный цельнометаллический корпус.

Например, при заклинивании трубы на стане холодной прокатки ребристых труб (ХПРТ) останавливается процесс изготовления, для возобновления процесса следует изымать накатываемую трубу, тем самым повышается время простоя, затрачиваемое на демонтаж трубы из корпуса устройства.

1.3 Сравнительный анализ методов оценки загрязненности поверхности алюминиевых сплавов

В данный момент на территории РФ не существует конкретного стандарта который определяет требования к очистке оребренных

биметаллических труб АВО, в ГОСТ Р 51364-99 “Аппараты воздушного охлаждения” отмечено лишь, что по требованию заказчика, после проведения операции накатки, оребренные поверхности должны быть очищены от продуктов смазочно-охлаждающей жидкости, а технология и контроль качества очистки поверхности несущих труб должны определяться технологической инструкцией предприятия-изготовителя.

В соответствии с ГОСТ 9.402-2004 степень загрязненности металлических поверхностей и в том числе поверхностей из алюминиевых сплавов классифицируется на два класса и определяется гравиметрическим методом согласно приложению “Определение общего загрязнения стальных изделий” Согласно данному методу:

- кусок ткани взвешивают. Результат взвешивания M_1 в граммах, записывают с точностью до четвертого десятичного знака (ткань хлопчатобумажная (миткаль, рубашечная, батист и др.), не оставляющая ворсинок на поверхности металла, размером 10×10 см, площадью 1 дм^2)
- накладывают шаблон на загрязненную поверхность и куском ткани тщательно протирают окно в шаблоне, стараясь перенести все загрязнения на ткань
- кусок ткани взвешивают. Результаты взвешивания M_2 в граммах, записывают с точностью до четвертого десятичного знака.

Общее загрязнение X_2 , г/м², вычисляют по формуле:

$$X_2 = \frac{M_2 - M_1}{S} * 100 \quad (1)$$

где M_1 - масса чистого куска ткани, г; M_2 - масса куска ткани с загрязнениями, г; S - площадь обработанной поверхности, дм².

За результат анализа принимают среднеарифметическое значение четырех параллельных определений, допустимое расхождение между которыми не должно превышать 10 %

Таблица 1. Степени загрязнения и характеристики загрязненной поверхности

Степень загрязнения	Характеристика загрязненной поверхности
Первая	Наличие тонких слоев минеральных масел, смазочных, смазочно-охлаждающих эмульсий, смешанных с металлической стружкой и пылью, до 2 г/м ²
Вторая	Наличие толстых слоев консервационных смазок, масел и трудноудаляемых загрязнений, графитовых смазок, нагаров, шлифовальных и полировальных паст свыше 2 г/м ²

В соответствии с ГОСТ 9.402-2004 описаны следующие методы:

1. Контроль степени обезжиривания капельным методом

Метод применяют для контроля поверхностей после обезжиривания органическими растворителями и водными моющими растворами. Перед испытанием обезжиренную поверхность изделия (образца) высушивают.

На поверхность изделия (образца) наносят 2-3 капли растворителя и выдерживают 15 сек.

К испытываемому участку поверхности прикладывают лист фильтровальной бумаги и прижимают его к поверхности до полного впитывания растворителя в бумагу.

На другой лист фильтровальной бумаги наносят 2-3 капли чистого растворителя и выдерживают до его полного испарения.

При дневном или искусственном освещении сравнивают внешний вид обоих листов фильтровальной бумаги.

Степень обезжиривания определяют по наличию или отсутствию масляного пятна на первом листе.

2. Контроль степени обезжиривания методом смачиваемости

Метод применяют для контроля поверхностей после ее обезжиривания водными растворами ТМС.

Метод заключается в определении времени сохранения сплошной пленки питьевой воды на обработанной поверхности до ее разрыва и основан на способности пленки воды или раствора не собираться в капли и сохраняться на чистой поверхности металла в течение определенного времени.

При определении степени обезжиривания изделие (образец) погружают в воду с содержанием солей по ГОСТ 6709 или распыляют на поверхность изделия (образца) раствор, содержащий 50 г нигрозина в 1 дм³ воды с содержанием солей по ГОСТ 6709.

Нарушение сплошности пленки фиксируют визуально при дневном или искусственном освещении, при этом не принимают во внимание поверхность, удаленную от краев и острых кромок менее чем на 10 мм.

Степень обезжиривания характеризуется временем в секундах от начала испытаний до разрыва пленки.

3. Контроль степени обезжиривания методом протирки

Метод применяют для поверхностей, обезжиренных водными моющими растворами и органическими растворителями.

Качество обезжиривания металлических поверхностей перед окрашиванием контролируют визуально при дневном или искусственном освещении. Подготовленную поверхность протирают чистой ветошью. Степень обезжиривания определяют по наличию или отсутствию на поверхности следов пыли и жировых загрязнений.

Таблица 2. Методы контроля качества обезжиривания

Степень обезжиривания	Время до разрыва пленки воды при испытании методом смачиваемости, сек.	Наличие масляного пятна на фильтровальной бумаге при испытании капельным методом	Наличие темного пятна на салфетке при испытании методом протирки
Первая	Более 30	Отсутствует	Слабо выраженное, расплывчатое
Вторая	Менее 30	Слабо выраженное, расплывчатое	Явно выраженное

Помимо методов, представленных в ГОСТ, были анализированы существующие способы и средства контроля поверхностей металлических изделий.

Различные методы были разработаны для измерения различных типов и иногда очень специфических загрязнений на металлических поверхностях. Тем не менее, в настоящее время доступно очень мало количественных измерений чистоты. Большинство методов испытаний являются качественными и не всегда точными. Количественные методы обычно очень сложны и их трудно адаптировать к производственным процессам. Однако обычно требуется сочетание разных методов, чтобы получить полную картину различных типов определения поверхности. Для непосредственного использования на производственной линии метод измерения требует сочетания характеристик. Он должен быть простым в использовании, без дополнительных требований к профессиональной компетенции, достаточно

надежным, чтобы давать воспроизводимые результаты, и в то же время быстрым и экономически эффективным.

Традиционно известны два типа методов контроля:

1. прямой метод контроля;
2. косвенный метод контроля.

Методы прямого контроля определяют загрязнения непосредственно на контролируемой поверхности, методы косвенного контроля основаны на экстрагировании загрязнений растворителем с последующим их анализом каким-либо другим методом.

Методы косвенных испытаний можно разделить на две основные группы методов испытаний. Первая группа описывает эффективность очистки путем анализа очищающего раствора. Вторая группа описывает чистоту поверхности путем аналитического исследования специальных растворов, где заготовки погружаются после процедуры предварительной обработки.

Извлечение промывных и аналитических методов, таких как атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS), спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (ICP), инфракрасная спектроскопия (IR), ионная хроматография необходимы для измерения количества загрязнений, после погружения образца в специальный раствор.

Атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS) – раздел оптической спектроскопии, изучающий закономерности поглощения (абсорбции) оптического излучения свободными атомами в газовой фазе. Наибольшее применение AAS нашла в аналитической химии, составляя основу атомно-абсорбционного анализа (AAA) – метода количественного определения элементного состава вещества по спектрам поглощения атомов. В основе аналитических приложений лежит избирательное поглощение атомом оптического излучения строго определённых длин волн.

Для измерения атомного поглощения используют атомно-абсорбционные спектрофотометры. Исследуемое вещество, как правило, предварительно переведённое в раствор, вводится в специальное устройство – атомизатор, где нагревается до высокой температуры и испаряется, превращаясь в атомарный пар. Через образовавшийся слой атомов пропускают оптическое излучение интенсивности I_0 на длине волны, характеристической для определяемого элемента (напр., для атомов свинца это излучение с длиной волны 283,3 нм). Просвечивающее излучение поглощается атомами тем сильнее, чем выше их концентрация в исследуемом веществе. Излучение интенсивности I , прошедшее через поглощающий слой, направляется далее в монохроматор, в котором выделяется требуемый спектральный интервал, детектируется приёмником оптического излучения и обрабатывается с помощью компьютера. Измеряемой величиной является абсорбционность, или оптическая плотность A , определяемая соотношением $A = \lg(I_0/I)$. Согласно закону Бугера – Ламберта – Бера, абсорбционность прямо пропорциональна концентрации атомов определяемого элемента в анализируемой пробе.

Спектрометры атомно-абсорбционные предназначены для определения содержания химических элементов (прежде всего, металлов) в жидких пробах (различные типы вод, напитки, биологические жидкости).

Индуктивно-связанная плазма, или (ICP), также известная как ИСП-АЭС (атомно-эмиссионная спектрометрия) или ИСП-ОЭС (оптико-эмиссионная спектрометрия), используется для анализа многих элементов одновременно и определяет содержание вплоть до 1-10 частиц на миллиард или част/млрд. Для ИСП используется аргоновая плазма, в которую вводится распыленная жидкая проба. В плазме проба ионизируется, и эти ионы испускают свет с различной длиной волны, которая затем измеряется.

Метод инфракрасная спектроскопия (IR), основан на том, что при пропускании инфракрасного излучения через вещество, происходит возбуждение колебательных движений молекул или их отдельных

фрагментов. При этом наблюдается ослабление интенсивности света, прошедшего через образец. Однако поглощение происходит не во всём спектре падающего излучения, а лишь при тех длин волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах. Следовательно, длины волн (или частоты), при которых наблюдается максимальное поглощение ИК-излучения, могут свидетельствовать о наличии в молекулах образца тех или иных функциональных групп и других фрагментов.

Метод ионной хроматографии основан на эквивалентном обмене ионов раствора на ионы неподвижной твердой фазы. Свойствами ионообменников обладает довольно большое число различных природных и синтетических соединений. Наибольшее практическое применение нашли синтетические органические иониты. Большинство этих ионообменников имеет матрицу из сополимера стирола с дивинилбензолом. Этот сополимер легко образуется и обладает достаточно высокой физической и химической устойчивостью в различных условиях. Полимер может быть использован в качестве ионообменника только после введения в матрицу ионогенных групп. Ионогенная группа состоит из двух ионов. Один из них прочно фиксируется за счет ковалентной связи и называется функциональной группой (фиксированным ионом). Ионы противоположенного заряда связываются с фиксированным ионом за счет электростатического взаимодействия. Они называются противоионами. Эти ионы могут обмениваться на эквивалентное количество ионов того же заряда из раствора. В зависимости от силы сопряженной кислоты (или основания) фиксированного иона ионообменники делятся на сильнокислотные, среднекислотные и слабокислотные (или основные).

Рассмотренные косвенные методы применимы в основном для исследования состава раствора, в результате чего устанавливается характер загрязненности образца, на которой воздействовал анализируемый раствор.

Данные методы не целесообразны и не применимы для оценки степени загрязненности поверхности биметаллической оребренной трубы после процесса очистки щелочными растворами.

Прямые методы контроля направлены на оценивание непосредственно поверхности металла. К ним можно отнести такие основные следующие методы:

1. Визуальный контроль

Этот метод испытаний очень прост и дает качественную оценку. Из-за характера этого метода, только загрязнения, которые имеют ярко выраженный цвет могут быть установлены. После очистки образец протирают белой льняной тканью или бумагой, присутствие загрязнений на ткани или бумаге указывает на плохую очистку, окрашивание поверхности порошком нигрозина в качестве индикатора делает этот метод испытания более эффективным.

В некоторых случаях, аналогичный метод испытаний проводится с использованием ленточного оттиска на образце вместо белой ткани.

Придерживающиеся пигменты могут быть подсчитаны позже на белой бумаге или путем регистрации изменения оптического пропускания с помощью денситометра при использовании прозрачной клейкой ленты. Оценка может быть улучшена с помощью световой микроскопии. Недостатками этого метода является тот факт, что могут быть обнаружены только незначительные загрязнения. Тонкие слои оксидных пленок, смазок или разделительных агентов не выявляются.

2. Флуоресцентный метод

Для этого теста требуются флуоресцентные минеральные масла или смазки, и образец следует исследовать в темной комнате с подходящим источником ультрафиолетового света. Как правило, используется ультрафиолетовое излучение с длиной волны 365 нм. Смазочные вещества в основном животного и растительного происхождения. Те места поверхности

которые не дают свечения, характеризуют о наличии загрязнения. Флуоресцентный метод является очень трудоемкий малоэффективный.

3. Кисотно-медный тест

Для кислотно-медного испытания заготовка должна быть изготовлены из материала, с средней активности к кислотной среде серной кислоты по сравнению с медью.

Образец погружают в раствор сульфата меди и серной кислоты. На поверхности, свободной от примесей, медь будет осаждаться в результате химической активности. Если условия очистки оптимизированы, медные отложения образуют сильно прилипшие, полусветлые отложения без пор.

4. Метод Нильсона

Этот метод испытаний представляет собой комбинацию теста на разрыв сплошности пленки питьевой воды и кислотно-медного теста. Десять загрязненных образцов сначала проверяют на разрыв пленки, а затем подвергнуты кислотно-медному тесту. Среднее время, необходимое для очистки десяти панелей, берется как мера эффективности условий очистки

5. Подсчет частиц

Если металлическая поверхность загрязнена частицами в принципе, то эти частицы до приблизительно 5 мкм можно считать. Они могут быть подсчитаны либо непосредственно на поверхности образца, либо после экстракции с использованием ультразвукового перемешивания. Вода фильтруется, и частицы на фильтре измеряются и рассчитываются под микроскопом. Что касается размера частиц, можно использовать несколько методов оптического контроля - от невооруженного глаза до сложного электронного микроскопа. Как и методы, описанные выше, оптический контроль невооруженным глазом или с меньшим увеличением ($2\ 100\times$) не очень точен. Подсчет частиц с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) является длительным и дорогостоящим, и можно контролировать только малые части образца.

6. Метод смачивания и поверхностного натяжения

Чистая поверхность имеет высокую поверхностную энергию и может смачиваться жидкостью (водой), если полученная поверхность имеет более низкую общую энергию. Наличие загрязнений (масла, смазки и т. д.) предотвращает образование тонкой однородной водной пленки. Вода стремится к распаду на отдельные капли, уменьшая тем самым площадь его поверхности и увеличивая открытую площадь поверхности подложки с низкой поверхностной энергией. Часто используются простые тесты, такие как тест на разрыв воды или тест распылителя, хотя полученные результаты часто являются неточными. Измерения поверхностного натяжения, угла контакта и баланса смачивания являются более точными, но эти методы требуют компетентности специалистов и более высоких затрат

7. Испытание на разрыв воды с погружением образца в воду

Тест состоит в погружении образца в чистую воду, чтобы выявить разрыв в водной пленке в загрязненной области. Это очень простой тест, широко используемый в промышленности [104, 109-113], потому что этот тест не занимает много времени (5-60 с). Однако, поскольку испытание зависит от толщины нанесенной водной пленки, что является фактором, который нельзя контролировать, ложные результаты могут быть получены из-за перекрытия остатков.

8. Испытание методом распыления воды

Чтобы сделать испытание на разрыв воды более чувствительным, было создано испытание методом распыления. Тестовые образцы очищают, окунают в кислоту, опрыскивают распылителем, содержащим раствор синего красителя. Непосредственно перед тем, как капли начинают течь, распыление прекращают и образец помещают в горизонтальное положение. Применяется нагрев образца для стабилизации. Индекс очистки представляет собой процент чистой поверхности от общей площади. Это определяется путем размещения сетки на образец, оценки производится в нескольких случайных

секторах и последующего усреднения для сообщенного значения. Испытание распылителя в 10-30 раз более чувствительно, чем испытание на разрыв воды, но оба метода испытаний иногда проблематичны, поскольку адсорбирующие примеси (поверхностные взаимодействия) могут оставаться на поверхности и в результате давать неверные результаты. В целом все эти методы испытаний не являются точными или количественными и дают только представление о содержании загрязнений на металлических поверхностях после процедуры очистки. С другой стороны, эти методы являются относительно быстрыми, дешевыми и практичными в производственных условиях, поскольку нет необходимости в специальных типах оборудования и обученном персонале

9. Поверхностное натяжение, угол контакта и баланс смачивания.

В данном методе наносится одна капля чистой воды на поверхность металла и исследуется двугранный угол контакта. Этот метод был впервые предложен Янгом в 19-м веке, и идея состоит в том, что двугранный краевой угол зависит только от поверхностного натяжения жидкости и поверхностного натяжения твердого тела. Предполагается, что двугранный краевой угол будет значительно варьироваться в зависимости от объема жидкости в капле. Однако существует много источников указывающих, что каждый метод должен оцениваться для применения в каждом конкретном процессе очистки. Тогда для разных форм поверхностного натяжения и смачивания измерения могут дать допустимый результат.

10. Радиоизотопный метод

Этот метод требует, чтобы радиоактивные атомы были смешаны с загрязнителем. Образцы равномерно покрыты загрязнителем и определяется их радиоактивность. После чего подвергают различным условиям очистки и измеряют их радиоактивность снова. Очищающая способность различных условий очистки может быть оценена по количеству радиоактивности, оставшейся на образце. Метод радиоизотопных трассеров - это очень

чувствительный тест, но он касается применения радиоактивных материалов в ограниченных количествах.

11. Взвешивание (Гравиметрия)

Этот метод также является оценкой чистоты. Образец взвешивается перед очисткой, затем повторно взвешивается после завершения, либо образец промывается в чистом растворителе (ацетонитриле или изопропанолем), количество загрязняющих веществ характеризуется весом оставшихся частиц после выпаривания жидкости. Для конкретных применений этот простой метод может обеспечить удовлетворительные результаты, но высокое содержание загрязнения может остаться незамеченным. Второй способ применения данного метода заключается в том, что заготовку помещают в печь с инертной атмосферой и нагревают до 250 - 300 ° С для удаления органических загрязнений, после чего отслеживают изменения веса.

Как и во всех методах экстракции, этот метод измеряет только средний уровень загрязнения, тогда как местные концентрации не могут быть оценены.

12. Электрические методы

Электрические метод, такой как измерение проводимости, измерение сопротивления поверхностной изоляции и испытания поверхностного сопротивления, часто используются в электронной промышленности, и некоторые из этих методов могут быть адаптированы для использования в производственной линии [16,11] также в других частях машиностроительной промышленности. В случае измерения проводимости экстракта растворителя эффективный ионный растворитель (чистая вода или смесь изопропилового спирта и воды) используется для удаления всего остаточного ионного загрязнения. Изменение электропроводности растворителя измеряется пропорционально концентрации растворенных ионов. Большим недостатком

такого типа измерения проводимости является тот факт, что определяется только ионное загрязнение, а не то, что осталось на исследуемом объекте.

На стальных поверхностях важные элементы, такие как Ca, Cl, P и Si, могут быть оценены с помощью рентгеновского спектрометрического метода [12].

Также, сообщается о неразрушающем методе контроля качества поверхностного загрязнения методом оптически стимулированной электронной эмиссии (OSEE) [12].

Спектроскопические, электронно- и ионно-микроскопические методы в большинстве случаев имеют более чем удовлетворительное обнаружение содержания загрязняющих веществ. К сожалению, эти методы также имеют недостатки, такие как высокая цена, сложные процедуры обработки и требования сверхвысокого вакуума.

Поэтому эти методы в основном используются в исследовательских целях, и их применение строго ограничено для анализа поверхности масла и жира. В основном они применимы для анализа оксидов и труднорастворимых солей.

Наиболее подходящие для адаптации методы оценки степени загрязненности поверхности оребренных труб являются спектрографические и флуоресцентные методы анализа.

В результате проведения патентных исследований были выявлены устройства, направленные на определения остаточных загрязнений на поверхности образцов.

SITA CleanoSpector и SITA cleanline CI обнаруживают остаточное загрязнение путем измерения флуоресценции, которая возбуждается ультрафиолетовым светодиодом (UV LED). Интенсивность флуоресценции зависит от количества загрязнения, обнаруженного на поверхности в точке измерения, т.е. чем выше флуоресценция, тем больше загрязнения обнаружено на поверхности. CleanoSpector – это инструмент

неразрушающего контроля чистоты, используемый для измерения органических загрязнений, таких как масло, смазка и чистящая жидкость на металлических поверхностях. Прибор широко используется в автомобильной и аэрокосмической промышленности и позволяет пользователям оценивать чистоту непосредственно на станции очистки, на производственной линии, во время полевых работ или в лаборатории.

Прибор был специально разработан для контроля чистоты на изготовленных металлических деталях во время и после процесса очистки, чтобы гарантировать отсутствие загрязнений на поверхностях перед следующим производственным процессом, например сборкой, герметизацией, склеиванием, покраской, печатью, лакировкой, лазерной сваркой.

Испытание результаты измеряются в степени чистоты металлических частей в процентном формате или в RFU (единица относительной флуоресценции).

Рефлектометр — GLOSSVETER. Измерения выполняются по степени отражения отпечатков загрязнения снятых с поверхности металла с помощью липкой прозрачной ленты. Настройку прибора производят по эталону белой бумаги, имеющей отражаемость по рефлектометру 100 ед. При выполнении измерений загрязнённости металла, прозрачную липкую ленту наклеивают на поверхность холоднокатаной полосы. Затем, полученный отпечаток наклеивают на белую бумагу и рефлектометром определяют степень отражаемости, которая уменьшается пропорционально увеличению количества загрязнений.

1.4 Выводы к первой главе

В результате анализа существующих технологий очистки оребренных биметаллических труб АВО и методов контроля загрязнённости поверхности алюминиевых сплавов были выявлены недостатки применяемых способов

очистки при производстве оребренных труб и методов контроля загрязненности поверхности.

Проведенные исследования доказывают, что используемая технология очистки оребренных труб в процессе изготовления методом холодной деформации на стане ХПРТ является энергозатратной, не эффективной и трудоемкой. А существующие методы контроля степени загрязненности не дают возможность в процессе изготовления дать количественную экспресс-оценку очищаемой поверхности.

Поставлена цель по разработке техники и технологии и сформулированы задачи для исследования влияния степени загрязненности на теплоэффективность оребренной трубы.

2. Разработка техники и технологии очистки оребренных труб в технологическом потоке производства

При разработке технологии очистки оребренных биметаллических труб за основу был взят химический метод очистки поверхностей из алюминиевых сплавов. Выбор наиболее эффективного раствора для очистки поверхности производился на основании методологии и рекомендации по очистке монометаллических и биметаллических труб и учтены следующие факторы:

- электрохимического поведения алюминиевых сплавов в растворах очистителей;
- количества жиров, оставшихся на поверхности после обработки в очистителях;
- скорости растворения металлов в растворах;
- шероховатости поверхности сплавов;

В лабораторном эксперименте использовались два варианта: водный раствор едкого натра с варьированием концентрации в пределах 5... 15%; водный раствор кальцинированной соды с варьированием концентрации в пределах 10...30%. Температура водного раствора поддерживается в пределах 50...60°C. Установлено, что при концентрации едкого натра в пределах 10... 15% происходит качественная очистка алюминиевых сплавов. Время обработки 1,0... 1,5 мин. Поверхность имеет однородный матовый цвет. После очистки оребренная труба промывалась в холодной воде. При концентрации раствора кальцинированной соды в пределах 10 и 30% продолжительность очистки составляла соответственно 3,0 и 1,5 мин. соответственно. Поверхность обработки имела однородный матовый цвет. После очистки труба промывалась в холодной воде.

На основе экспериментальных данных в качестве основы для моющей жидкости был выбран водный раствор едкого натрия с концентрацией 10% с температурой 40 - 50 С.

При разработке технологии и проектировании конструкции устройства очистки были поставлены задачи, решения которых должны были исключить недостатки имеющихся аналогов. За основу было взято подача моющего раствора на поверхность трубы под давлением. Циркуляция раствора обеспечивается в замкнутом контуре емкости узла очистки, а за счет компактности и простоты конструкции установка размещается соосно со станом ХПРТ, что исключает лишние операции по перемещению трубы и реализует процесс очистки во время ее изготовления. На рисунке 3 представлена технологическая схема процесса очистки оребренной трубы.

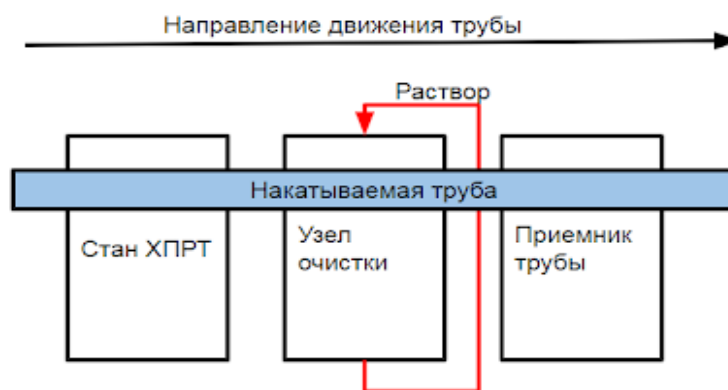


Рисунок 3. Технологическая схема процесса очистки оребренной трубы

При разработке технологии была изготовлена экспериментальная модель узла очистки оребренных труб и проведены испытания на бугульминском механическом заводе. В качестве материала для изготовления был выбран полиметилметакрилат (органическое стекло). Данный материал не вступает в реакцию с рабочим раствором, а также довольно легкий и прозрачный материал, который просто поддается обработке. Модель узла включала в себя резервуар прямоугольного типа с открывающейся сверху крышкой, с торцов имеются круглые отверстия с резиновыми уплотнителями для подачи в него трубы. Рабочий объем модели узла очистки равен 30 литрам. В нижней части конструкции встроен

нагревательный элемент поддерживающей раствор в пределах заданной температуры. Процесс очистки происходит за счет подачи на поверхность трубы через форсунки, установленные в верхнюю крышку моещего раствора. Раствор подается в противоход трубы и постоянно циркулирует с помощью насоса, который забирает раствор через вакуумно стойкий шланг из нижней части узла. Конструкция устанавливается на специальные металлические стойки между станом ХПРТ и приемником трубы.

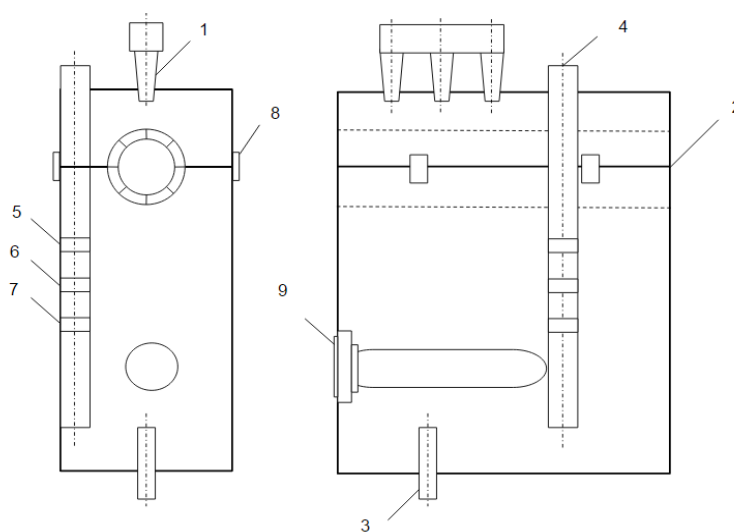


Рисунок 4. Экспериментальная модель узла очистки оребренных труб.

В результате эксперимента было выявлено что модель успешно выполняет функцию очистки, а производительность составляет десять двенадцатиметровых труб, очищенных одной партией приготовленного раствора до того, как он теряет свои свойства.

Методом протирки поверхности трубы белой ветошью было визуально определена разница между очищенной трубой и трубой не подвергавшейся процессу очистки. На рисунке 5 представлен визуальный контроль образцов.



Рисунок 5. Визуальный контроль образцов.

Для изготовления рабочей версии устройств очистки трубы и исключения недостатков, выявленных во время испытаний модели, были поставлены следующие задачи:

- увеличение производительности
- избавление от шлангов и насосной станции
- подбор оптимального материала

Для увеличения производительности было принято решение замены устройства очистки оребренных труб на автоматизированную систему, состав которой должны входить: узел подготовки раствора, узел очистки трубы и узел утилизации и регенерации моющего раствора.

Количество производимых труб на одной линии в цеху варьируется от 100 до 150 штук в смену, разработка узла подготовки моющего раствора под управлением автоматизированной системы позволит решить вопрос малой производительности. Автоматизированная система управления будет реализовывать подготовку моющего раствора и оперативную замену, с дальнейшим сливом отработанного раствора в узел регенерации.

Избавление от дополнительных элементов находящимся за пределами узла (шланги, насос) возможно за счет замены центробежного насоса на вибрационный и его размещения в емкость узла очистки.

В качестве материала для изготовления узла очистки была выбрана нержавеющая сталь в связи с тем, что не вступает в реакцию с щелочами и имеет высокую прочность в сравнении с полиметилметакрилатом из которого была выполнена модель.

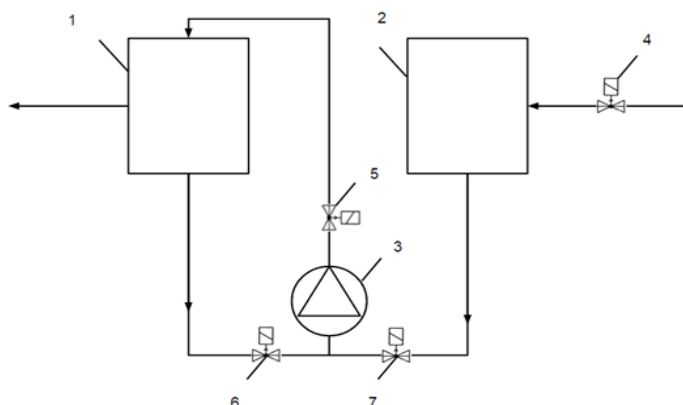
2.1 Узел подготовки раствора

Для оперативной замены раствора в системе очистки оребренных труб разработан узел подготовки моющего раствора. Подготовка моющей жидкости происходит во время включения автоматизированной системы управления. После того, как система понимает, что моющий раствор приготовлен и его параметры соответствуют необходимым технологическим свойствам, происходит его подача в узел очистки. Последующие циклы приготовления раствора реализуются после очистки 15 труб до того времени, как предыдущая порция раствора потеряет свои свойства (после 20 труб). Предполагается, что после очистки лимитированного количества труб (20 труб) происходит слив отработанного раствора в отстойник и подача нового моющего раствора, с последующим повторением циклов.

В состав узла подготовки раствора входят: резервуар объемом 60 литров, электрический дозатор, моторизованный кран, электрические клапана.

Сетевая вода подается через электрический клапан (4) в резервуар узла подготовки моющего раствора (2) где подогревается до температуры 65 градусов Цельсия, после чего в нее добавляется каустическая до тех пор, пока показатель жесткости раствора не будет равен 12. Как только моющий раствор в узле подготовки будет готов к использованию, открываются (7) и (5) задвижки и включается насос (3), тем самым заполняя узел очистки оребренных труб (1) рабочим раствором. После заполнения узла очистки до нужного уровня, электрический клапан (7) закрывается и раствор начинает циркулировать через насос в узле очистки. На рисунке 6 представлена

технологическая схема взаимодействия узла очистки и узла подготовки моющего раствора



1 - узел очистки оребренных труб; 2 - узел подготовки моющего раствора; 3 - циркуляционный насос; 4 - электрический клапан; 5, 6, 7 - моторизованные краны;

Рисунок 6. Технологическая схема взаимодействия узла очистки и узла подготовки моющего раствора.

Узел подготовки моющего раствора представляет из себя резервуар, выполненный из нержавеющей стали объемом 60 литров. Сверху над емкостью на металлической раме установлен электрический дозатор (4), холодная сетевая вода подается через электрический клапан (3) и нагревается до нужной по технологии температуры трубчатым электрическим нагревателем (2). По завершению процесса подготовки моющий раствор подается в узел очистки через моторизованный кран (1).

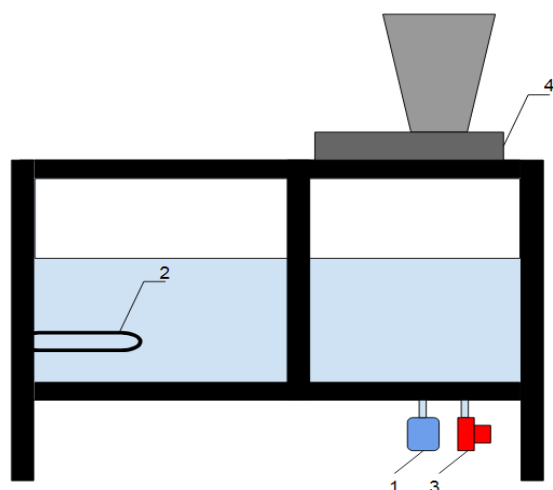


Рисунок 7. Общий вид узла подготовки моющего раствора

2.2 Узел очистки оребренных труб

Проектирование и изготовление узла очистки выполнено согласно требованиям технического задания НТУ для Бугульминского механического завода по договору № 0335/22/289.

Узел очистки оребренных труб изготавливается в виде резервуара прямоугольной формы с открывающейся сверху крышкой. Откидывающаяся крышка позволяет извлечь оребренную трубу из узла в случае срыва оребрения валками ХПРТ или заклинивания ХПРТ.

С торцов узла имеются круглые отверстия с резиновыми уплотнителями для подачи в него трубы. Резиновый уплотнитель состоит из двух листов с радиальными вырезами в форме лепестков. Лепестки совмещены таким образом, что середина лепестка одного листа попадает на вырез между лепестками другого листа. При прохождении оребренной трубы через узел, резиновый уплотнитель выгибается. Лепестки первого листа начинают плотно прилегать к поверхности оребренной трубы, но при этом они выгибаются по ходу движения оребренной трубы. Зазор, образованный в вырезе между лепестками первого листа, закрывают лепестки второго листа,

что обеспечивает полностью герметичное соединение между узлом и оребренной трубой, от разбрызгивания и паров моющего раствора.

В нижней части узла имеются два нагревательных элемента, выполняющие подогрев моющего раствора в пределах заданной температуры. Нагревательные элементы являются съемными. При выходе из строя одного из них в процессе оребрения можно не останавливать процесс очистки и в кратчайшие сроки заменить его после окончания оребрения.

В открывающуюся сверху крышку узла установлены форсунки, собранные в гребенку. Установленные в ряд форсунки обеспечивают полную очистку поверхности оребренной трубы даже в случае забивания нескольких из них.

В резервуаре узла над уровнем моющего раствора установлена сетка, обеспечивающая фильтрацию моющего раствора от крупных механических примесей. После окончания процесса оребрения можно удалить загрязнения с сетки механическим способом.

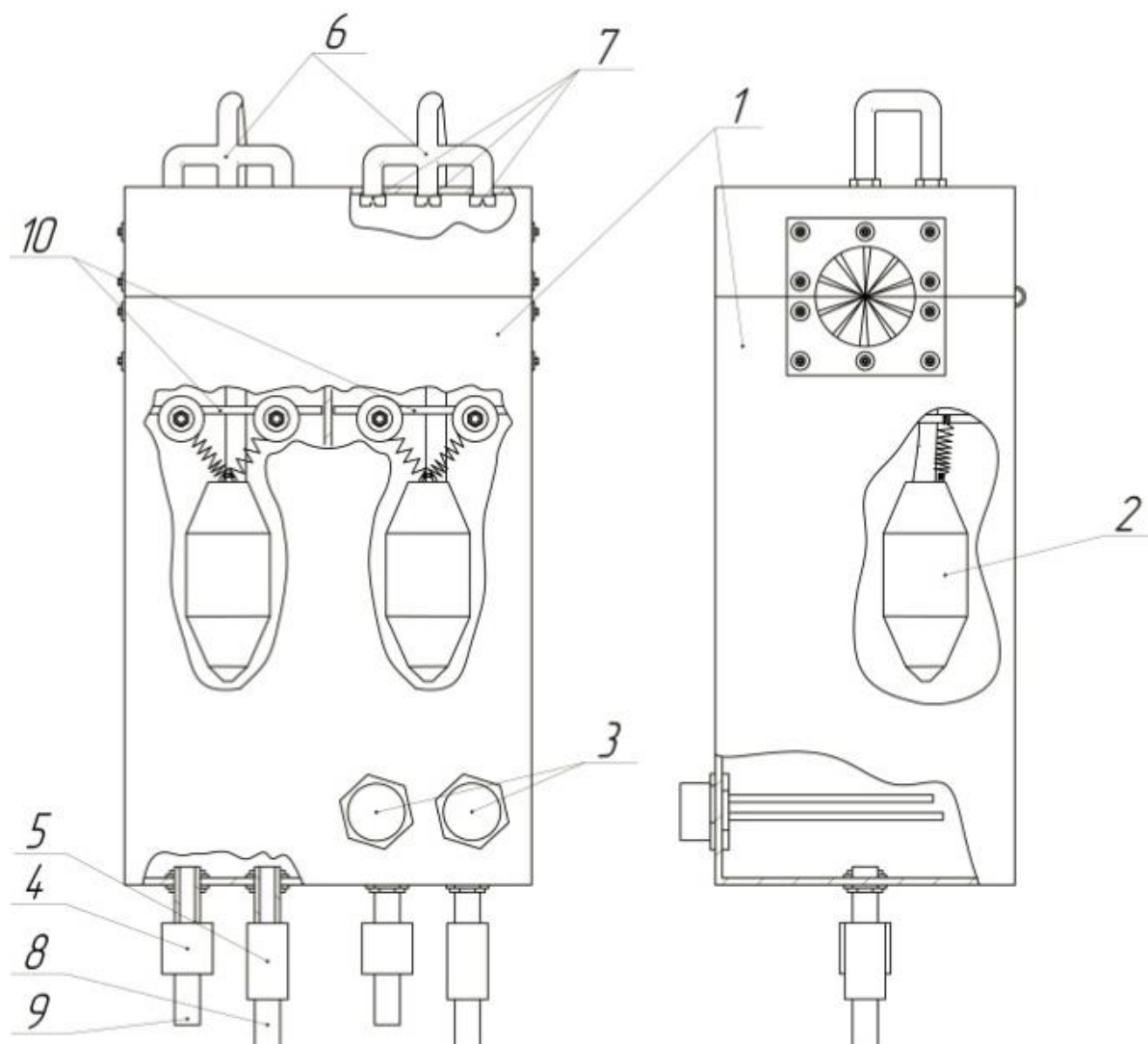
Узел устанавливается на специальную подвижную раму, обеспечивающую возможность отодвинуть её вместе с узлом, при необходимости подойти к ХПРТ со стороны выхода оребренной трубы.

В резервуаре моющего раствора устанавливается вибрационный насос, обеспечивающий циркуляцию моющего раствора в узле. Вибрационный насос позволят создавать необходимую флуктуацию корпуса узла очистки, препятствующую образованию солевых отложений на стенках резервуара и накипи на ТЭНах. В случае применения не вибрационных насосов корпус узла следует оснащать эксцентрическим или иным флуктуатором.

В случае необходимости промывки оребренной трубы, после её очистки узел очистки моющего раствора может быть изготовлен с контуром для промывки оребренной трубы. Контур промывки оребренной трубы является аналогичным контуру очистки оребренной трубы. Два контура

совмещаются в одном корпусе узла с разделительной перегородкой, оснащенной собственным резиновым уплотнителем.

Общий вид узла очистки оребренных труб представлен на рисунке 8.



- 1 - резервуар узла очистки; 2 - вибрационный насос; 3 - трубчатый нагревательный элемент;
- 4 - моторизованный кран подачи моющего раствора; 5 - моторизованный кран возврата моющего раствора; 7 - гребенка
- 8 - входной штуцер; 9 - выходной штуцер; 10 - сетка, обеспечивающая фильтрацию моющего раствора от крупных механических примесей

Рисунок 8. Общий вид узла очистки оребренных труб

Для успешного функционирования, узлу очистки оребренных труб требуется определённое взаимодействие с другими элементами процесса оребрения биметаллических труб. Схема взаимодействия узла очистки оребренных труб представлена на рисунке 9.

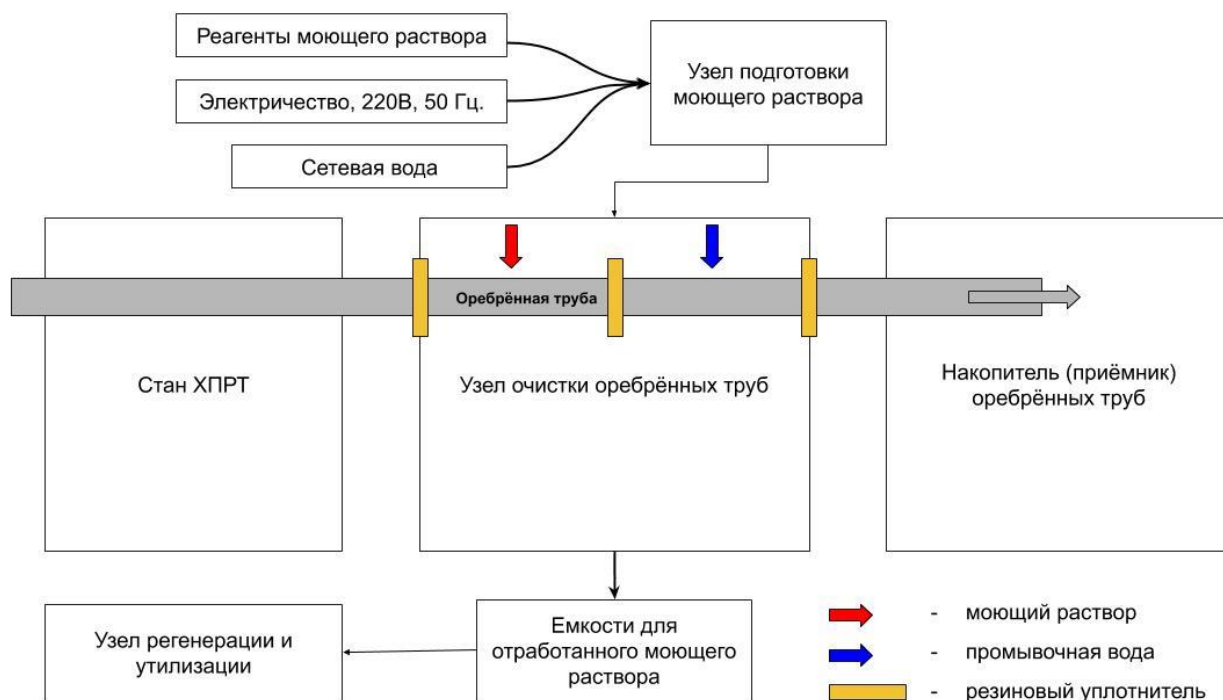


Рисунок 9. Схема взаимодействия узла очистки оребренных труб.

Узел очистки оребренных труб должен быть установлен между станом ХПРТ и накопителем (приёмником) оребренных труб таким образом, чтобы оребренная труба в процессе накатки, поступающая из стана ХПРТ была соосно отверстиям в корпусе узла. При установке узла откидывающаяся крышка не должна мешать оператору обслуживать узел, то есть крышка должна открываться от оператора. Устройство должно быть установлено на специальную подвижную раму для удобства обслуживания. Расстояние от узла до накопителя (приемника) оребренных труб должно позволять визуально контролировать качество очистки оребренной трубы, а также быть достаточным для ручного доведения оребренной трубы до края накопителя

(приемника) после окончания процесса оребрения или для установки дополнительных устройств и механизмов.

Участок или цех оребрения труб должен быть оснащен емкостью для сбора и хранения отработанного моющего раствора, поступающего из узла очистки. От узла очистки до ёмкости следует проложить трубопровод, по которому будет осуществляться перекачивание отработавшего моющего раствора из узла в емкость.

До места установки узла очистки оребренных труб следует проложить трубопровод для подачи технической сетевой воды давлением не более 1 МПа. Вода необходима для подготовки нового моющего раствора в узле очистки оребренных труб и для промывки оребренных труб.

До места установки узла очистки оребренных труб следует провести электрический ток номиналом 220 В, 50 Гц. Суммарная расчетная мощность элементов узла не превышает 10 кВт. Электрический ток необходим для работы насосов, нагревателей, КИПиА.

Для подготовки моющего раствора следует применять следующие реагенты: каустическая сода, средство для подавления пенообразования. Моющий раствор приобретает моющие свойства при температуре от 50 до 60-ти градусов Цельсия при РН от 10 до 11. Точная дозировка средств и режимов работы узла очистки оребренных труб зависит от реальных режимов работы ХПРТ и утверждается на этапе “Проведение испытаний системы автоматизации процесса очистки”.

2.3 Автоматизированная система управления технологическими процессами очистки

Для успешного функционирования автоматизированной системы управления узла очистки оребренных труб были определены алгоритм работы и способы взаимодействия функциональных частей изделия. Функциональная электрическая схема взаимодействия комплекса

технических средств автоматизированной системы управления узла очистки оребренных труб представлена на рисунке 10. На схеме изображено функциональное взаимодействие управляющей платформы на базе AVR-микроконтроллера ATmega168 с исполнительными и контрольно-измерительными приборами.

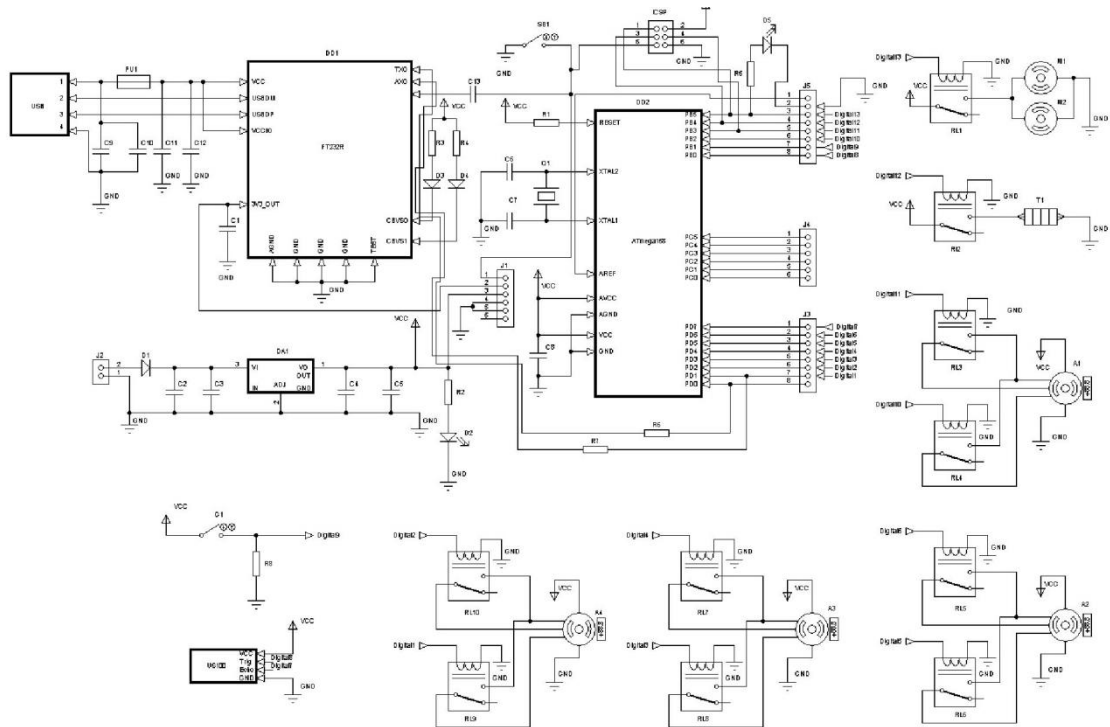


Рисунок 10. Функциональная электрическая схема.

В качестве исполнительных механизмов для управления процессом очистки оребренной трубы используются:

1. Вибрационный погружной насос
2. Трубчатый нагревательный элемент
3. Моторизированный шаровый кран
4. Электрический клапан

В качестве контрольно-измерительных приборов для управления процессом очистки оребренной трубы используются:

1. Ультразвуковой датчик расстояния
2. Индуктивный датчик

3. Датчик температуры

При включении автоматизированной системы управления узла очистки оребренных труб управляющая вычислительная платформа на базе AVR-микроконтроллера ATmega168 (DD2) опрашивает ультразвуковой датчик присутствия (US-100) на наличие трубы в резервуаре узла, при соблюдении данного условия контроллер отправляет сигнал с порта (Digital13) на твердотельное реле (R11), тем самым замыкает цепь для включения вибрационных погружных насосов (M1 и M2). Трубчатый нагревательный элемент подключен к порту (Digital12), который отправляет сигнал на реле (R12) при условии, что в резервуаре имеется требуемое количество моющего раствора. Моторизированные краны установлены на входных и выходных штуцерах узла очистки оребренных труб, двое из них используются для подачи и возврата промывочной воды, а следующие два для подачи и возврата моющего раствора.

Моторизированный кран (A1) через твердотельное реле (R13, R14) подключен к пинам (Digital11, Digital10) таким образом, что, когда сигнал выходит с порта (Digital11) происходит открытие крана, при подаче сигнала с порта (Digital10) закрытие.

Моторизированный кран (A2) через твердотельное реле (R15, R16) подключен к пинам (Digital6, Digital5). Моторизированный кран (A3) через твердотельное реле (R17, R18) подключен к пинам (Digital3, Digital4). Моторизированный кран (A4) через твердотельное реле (R19, R10) подключен к пинам (Digital1, Digital2).

Датчик индуктивности (G1) устанавливается на створки приемника и служит для подсчета количества очищенных оребренных труб. При раскрытии створок датчик индуктивности отправляет сигнал на порт (Digital9). После промывки определенного количества труб система сигнализирует о необходимости замены моющего раствора.

Программное обеспечение системы управления автоматизированного процесса очистки НТУ представляет собой исходный код компьютерной программы, разработанный на языке программирования C++, транслируемый в исполнительный код при помощи программной оболочки и скомпилированный в компьютерный файл.

Исходный код программы следует загружать в процессор для выполнения последовательных операций промышленном контроллером.

Для успешного функционирования автоматизированной системы управления узла очистки оребренных труб необходимо выстроить на машинном уровне алгоритм работы и способы взаимодействия функциональных частей изделия с помощью контроллера.

В структуре программы построен алгоритм машинных операций и настройка технических функций процессора реализуемых на управляющей платформе. Ниже в тексте следует детальное описание алгоритма работы ключевых процессов исходного программного кода со ссылками на строки листинга исходного кода.

Строка №1 листинга исходного кода “List_for_SOOT.ino” реализует подключение библиотеки “SoftwareSerial” которая позволяет реализовать последовательный интерфейс на любых цифровых выводах.

Строка №2 декларирует переменную pump с классом типа integer и указывает что циркуляционные насосы управляются цифровым портом 13. Также декларируются остальные исполнительные механизмы в строках 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 где heater - трубчатый нагреватель, actuator_on - открытие крана, actuator_off - закрытие крана.

Строка №12 декларирует переменную, которая определяет наличие и отсутствие трубы в проеме узла очистки оребренной трубы.

Строка №13 декларирует переменную фиксирующую количество помывтых оребренных труб в узле очистки оребренных труб.

Строка №14 декларирует переменную фиксирующую переход состояния датчика, который определяет наличие и отсутствие трубы в проеме узла очистки оребренной трубы.

Строки №15, 16, 17, 18 используются для работы датчика расстояния и фиксации сигнала

Строка №21 декларирует переменную level с классом типа integer и указывает, что датчик уровня жидкости подключен к аналоговому порту A0.

Строка №22 декларирует функцию инициализации и настройки портов входа/выхода к которым подключены исполнительные и контрольно-измерительные устройства, где константы OUTPUT/INPUT определяют отправку или прием сигнала на порт контроллера.

Строка №38 декларирует функцию регистрации наличия трубы во входном отверстии узла очистки.

Строка №48 декларирует функцию запуск циркуляции раствора

Строки №71, №82, декларирует функции, которые реализуют возможность регистрации количества очищенных труб.

Строка №100 декларирует функцию, которая реализует сигнал к замене раствора.

Строка №112 декларирует функцию считывания команд с узла подготовки раствора.

Строки №112, 144 используются для реализации подачи моющего раствора в узел очистки и его слива после отработки.

Строка №152 декларирует функцию, которая реализует цикличность исполнения всех функций.

2.4 Монтаж узла очистки оребренных труб

При монтаже узла очистки оребренных труб необходимо выполнить следующие требования:

- Узел очистки располагается сразу же после стана оребрения труб ХПРТ (рисунок 12).
- Ось накатываемой трубы и отверстия для входа и выхода трубы корпуса узла очистки должны быть соосны, так как процесс оребрения и очистки последовательны (рисунок 12).
- Узел очистки оребренных труб должен по своим габаритам уместиться в пространстве между станом ХПРТ и трубоприёмником.
- На успокоителе узла очистки со стороны трубоприемника должна быть смонтирована рама, на которой будет находиться корпус узла очистки. Рама должна быть приварена к успокоителю таким образом, чтобы поверхность 10 соприкасалась с корпусом узла очистки и не затрудняла вращение успокоителя.
- Конструкция рамы должна иметь эргономичную конструкцию с интуитивно понятными механизмами взаимодействия с узлом (рисунок 2).
- Конструкция рамы узла очистки оребренных труб должна предусматривать возможность легкого демонтажа узла для его дальнейшей модернизации и комплектации различными устройствами для устранения выявленных в процессе эксплуатации недостатков и повышения функциональности узла очистки.
- Конструкция рамы должна выдерживать вес корпус узла очистки вместе с рабочими растворами, не менее 120 кг.
- Ребра рамы не должны соприкасаться с патрубками и ТЭН-ами и затруднять извлечение корпуса узла очистки из рамы.
- Успокоитель узла очистки со стороны стана ХПРТ не должен быть жестко закреплен как к раме, так и к корпусу узла очистки для того чтобы обеспечить свободу перемещения узла очистки относительно второго успокоителя, находящегося со стороны трубоприемника.

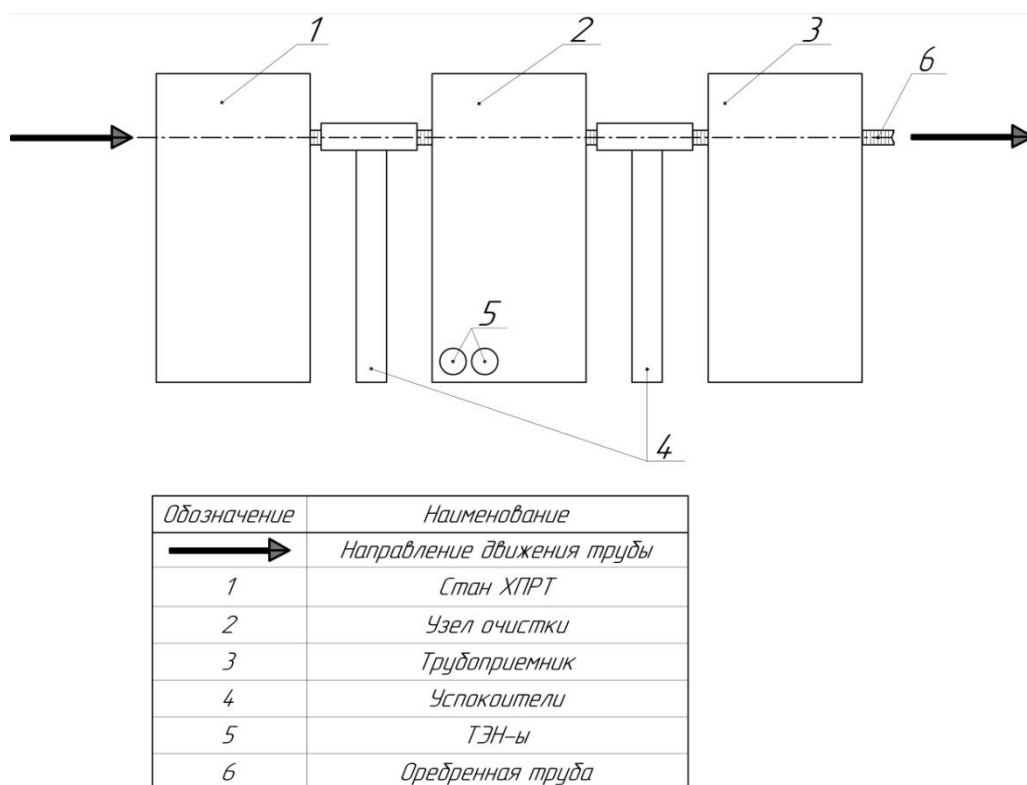


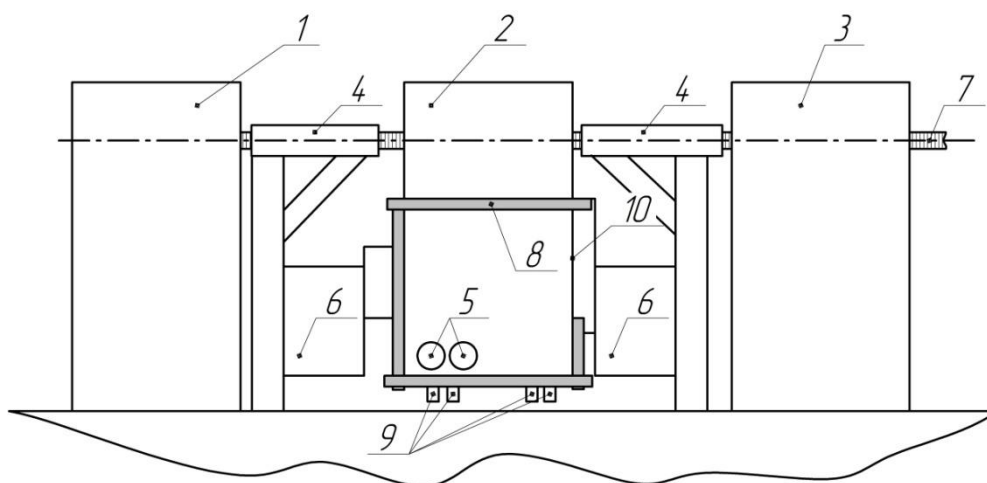
Рисунок 11. Структурная схема расположения узла очистки

Дополнительные требования и оснастка:

1. Узел очистки должен работать от электрической сети переменного тока номинальным напряжением 220 Вольт 50 ГЦ.

2. К узлу очистки необходимо подвести два шланга в секцию с двумя ТЭНами для подачи моющего раствора и слива отработанного моющего раствора, а также два шланга для подачи и слива технической воды в соседнюю секцию.

3. После проведения этапов испытания и апробации с использованием существующих. Для функционирования системы очистки оребренных труб должны быть предусмотрены дополнительные резервуары для хранения моющего раствора и отработанного раствора.



<i>Обозначение</i>	<i>Наименование</i>
1	Стан ХПРТ
2	Узел очистки
3	Трубоприемник
4	Успокоители труб
5	ТЭН-ы
6	Успокоитель узла очистки
7	Оребренная труба
8	Редра рамы
9	Патрубки

Рисунок 12. Схема монтажа узла очистки

2.5 Выводы ко второй главе

Во второй главе описаны результаты разработки:

- технологии очистки оребренной трубы в процессе ее изготовления методом подачи щелочного раствора на поверхность трубы под давлением;
- экспериментальной модели узла очистки оребренных труб
- узел подготовки моющего раствора
- узел очистки оребренной трубы
- автоматизированной системы управления узлами

Экспериментальная модель узла очистки прошла успешно апробацию на БМЗ ПАО «Татнефть»

3. Утилизация и регенерация отработанного моющего раствора

3.1 Исследования отработанного моющего раствора

При производстве биметаллических оребренных труб АВО методом холодной деформации используют щелочные моющие растворы для очистки поверхности от смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Через определенный период, раствор насыщается СОЖом и продуктами механической обработки заготовок. Отработанный раствор относится к веществам второго класса опасности, вследствие этого появляется потребность в утилизации отработанного раствора. Отработанный моющий раствор представляет собой эмульсию, состоящую из воды, растворенной щелочи, смазывающих масел. Выбор эффективного метода или комбинации методов очистки в данном производстве зависит от объема, типа и состава эмульсионных сточных вод, концентрации загрязнения и требуемой степени очистки, для возможного повторного использования очищенных сточных вод.

Классификация методов очистки масло-эмульсионных сточных вод, составленная на основе обобщения отечественных и зарубежных данных в зависимости от исходного содержания масел и их физического состояния, представлена на схеме ниже (рис.14).

Метод переработки и последующей очистки отработанных растворов, насыщенных смазочно-охлаждающими жидкостями, имеет большую актуальность. На предприятиях выбор того или иного способа очистки определяют количественным составом, дефицитом применяемых реагентов, техническими условиями и прочими возможностями.

На одном из предприятий, изготавлиющем биметаллические оребренные трубы, был взят в качестве образца для исследования некоторый объем сточных вод. После изучения состава отработанного образца, исследуемый образец сточной воды с водородным показателем $pH = 11$

(щелочная среда) подвергался физико-химическому, электро-химическому, физическому и термическому методам воздействия с последующей механической фильтрацией. Способом фильтрации сточной обрабатываемой воды использовались на закрытых фильтрах с использованием гидроантрацита, кварцевого песка, дробленого керамзита, а также очистка с применением полуволоконной мембраны ультрафильтрации ZeeWeed.

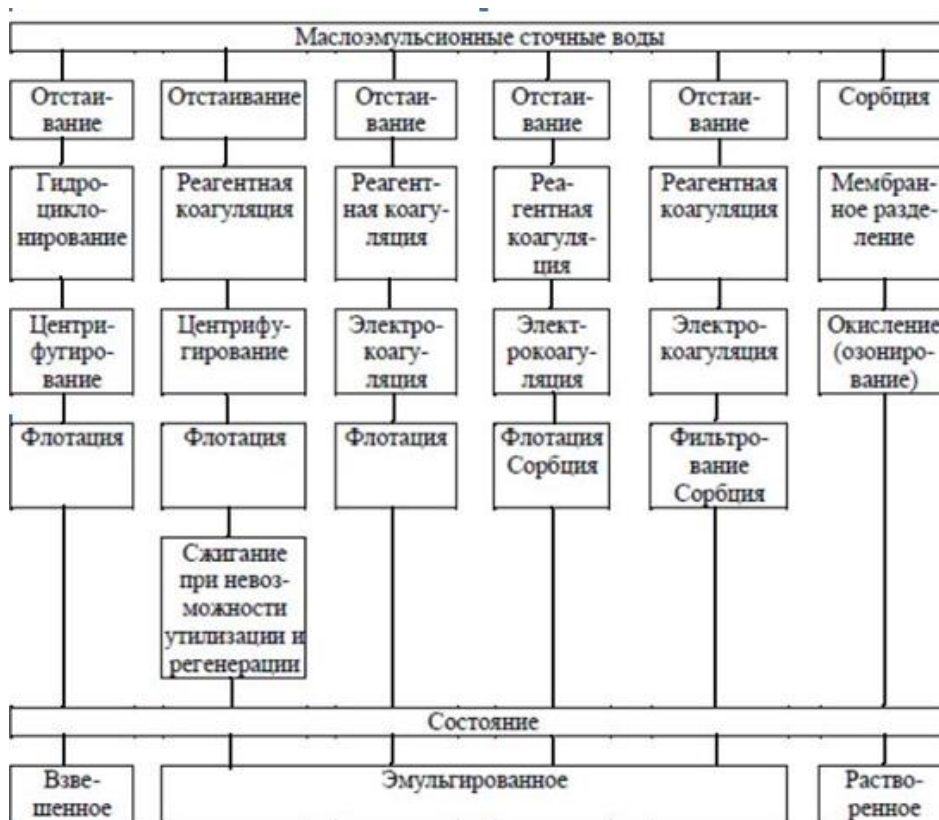


Рисунок 13. Классификация основных методов очистки масло - эмульсионных сточных вод

Физический метод, основанный на гравитационном отстаивании и последующей фильтрации через фильтр, не дал положительных результатов по отделению водяной и масляной фракций из эмульсии. Сточная вода осталась однородной первоначальной консистенцией.

Термический и электрохимический методы проводились в последовательной цепочке. Эта часть является многооперационной с

применением сложного лабораторного оборудования и систем контроля. В технологическом процессе для эксперимента был проведен процесс электрокоагуляции стальным и алюминиевым электродами, которые были подключены к преобразователю напряжения. Под действием электрического тока происходила электролитическая реакция распада алюминия, но образец не изменил характеристик, которые описаны при очистке сточных вод методом электрокоагуляции для образования осадка и при котором осадок является коагулянтom и коагулируя сточную воду происходила бы реакция оседания.

Ток был выставлен в 4А, напряжение 12 В, стальной электрод покрывался оксидной пленкой, а алюминиевый электрод распадался, образуя осадок на дне колбы. При перемешивании смеси для равномерного распределения и объемного входа в реакцию распавшегося алюминия, разделения не происходило. Результат был отрицательным по причине высокой щелочности сточной воды. При высокой щелочности алюминиевые содержащие реагенты также не входят в реакцию и для этого подкисляют обрабатываемый раствор. В нашем случае подкисление ведет к последующему увеличению подпитки реагента щелочи для моющего раствора, что приводит к увеличению затрат на данную технологию.

При процедуре нагрева в термореакторе (Nash LT200) задачей преследовалась цель разрушить водно-масляную связь и деструктурировать суспензию. Предполагалось, что эмульсия за счет нагрева раствора разделится на фазы масло – вода, в результате чего вода окажется в нижней части в связи с тем, что имеет большую плотность относительно масла. Эксперимент не дал положительных результатов. При увеличении нагрева выше 70 градусов на стенках оборудования и трубах образовались маслянистые налеты, в связи, с чем эксперимент в этом направлении был приостановлен из-за риска повреждения технологического оборудования.

Физико-химический метод с применением реагентного способа очистки дал положительный результат. В качестве реагентов использовались кислоты в товарном виде. Образец подвергался реагентной обработке с введением того или иного вещества и проходила фильтрацию сорбцию на фильтре «Синяя лента» размером пор 5 микрон и фильтра с засыпным материалом гидроантрацит.

Методом ультрафильтрации был получен наилучший результат и самая качественная очистка воды от отработанного моющего раствора с разделением от нефтепродуктов. Положительным фактом определено является безреагентный способ обработки. То есть, вода не меняет свою щелочность при кислотной обработке и не придется повторно расходовать реагент для доведения моющего раствора к требуемому показателю $pH > 12$. Однако данный способ требует дорогостоящих вложений и последующих во время эксплуатации осаждения алюминатов применяя подкисления до pH 5,5-6,5. В качестве ультрафильтрации использовалась волоконная трубчатая мембрана 0,04 мкр, инструментом отделения воды от масла использовался медицинский поршневой насос с присоединенной мембраной.

При дозировании лимонной кислоты соотношением 1:20 (5мл/л) в образце сточной воды системы очистки оребренных труб происходило изменение цвета от бежевого с сероватым оттенком до серого цвета раствора. Консистенция раствора не изменилась. При фильтровании на фильтре задерживался осадочный материал, а отфильтрованная вода стала более прозрачной (как оценивалась прозрачность?) по сравнению с исходной сточной водой, а также при отстаивании образовался осадок белого цвета. Определение мутности отфильтрованной воды проводилось мутномером НАСН 2100 Q и составила 18,6 NTU, в то время, как значение мутности исходной сточной воды составляла более 1500 NTU. Отфильтрованный раствор нейтрализуется с показателя $pH=11$ до $pH=8$. Так как для

приготовления 1 литра 50% насыщенного раствора лимонной кислоты потребуется 500 грамм сухого вещества, то ее применении в качестве реагента в масштабах предприятия будет дорогостоящи.

При дозировании соляной кислоты соотношением 1:40 (2,5 мл/л) в образец сточной воды системы очистки оребренных труб, происходило изменение консистенции и цвета раствора, при дальнейшем фильтровании на фильтре задерживался осадочный материал, а отфильтрованная вода стала более прозрачной по сравнению исходной сточной водой. Определение мутности отфильтрованной воды проводилось мутномером НАСН 2100 Q и составила 51,3 NTU, в то время, как значение мутности исходной сточной воды составляла более 1500 NTU. Отфильтрованный раствор нейтрализуется с показателя рН=11 до рН=8,5.

При дозировании соляной кислоты соотношением 1:20 (5 мл/л) в образец сточной воды системы очистки оребренных труб происходило изменение цвета от бежевого с сероватым оттенком до молочно-белого цвета раствора. Консистенция раствора стала более густой. При дальнейшем фильтровании на фильтре задерживался осадочный материал, а отфильтрованная вода стала прозрачной по сравнению исходной сточной водой и предыдущего эксперимента в соотношении 1:40. Определение мутности отфильтрованной воды проводилось мутномером НАСН 2100 Q и составила 10,3 NTU, в то время, как значение мутности исходной сточной воды составляла более 1500 NTU. Отфильтрованный раствор нейтрализуется с показателя рН=11 до рН=6.

В ходе исследования было выявлено, что наиболее оптимальным является осветление сточных вод системы очистки оребренных труб с применением физико-химического метода, что подразумевает использование реагентного способа очистки с применением в качестве реагентов кислот. В результате реагентных обработок обнаружено, что наилучшие показатели

были достигнуты при использовании соляной кислоты в соотношении 1:20 к сточной воде.

Результаты исследований позволили разработать способ регенерации отработанного моющего раствора в системе очистки оребренных труб с применением соляной кислоты, фильтрацией продуктов осаждения и возврата очищенной воды в узел приготовления моющего раствора.

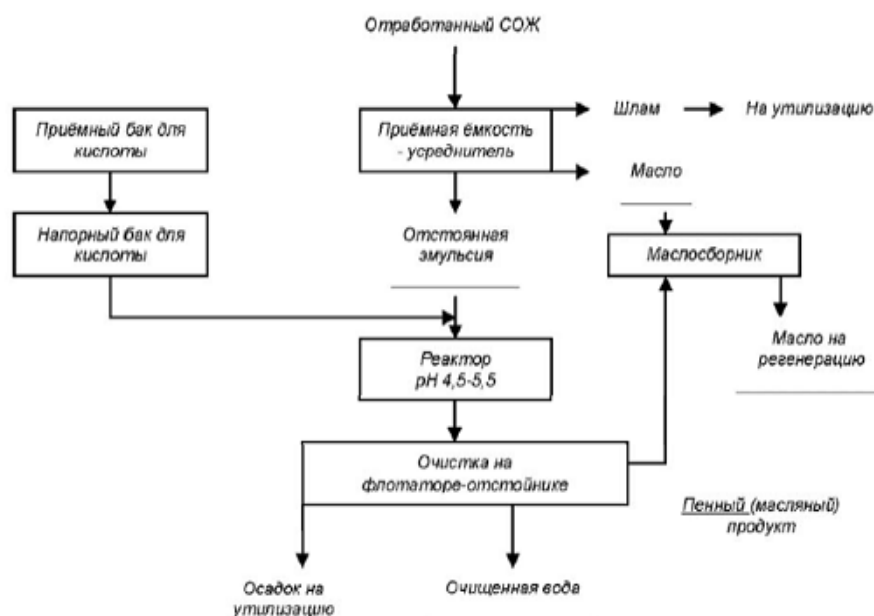


Рисунок 14. Технологическая схема обработки отработанного моющего раствора.

В процессе мойки труб сточная вода системы очистки оребренных труб накапливает в себе ионы алюминия в виде алюминатов:



В случае, если поверхность металла уже пассивированная, то наблюдается следующее уравнение реакции:



Накопление алюминатов постепенно дестабилизирует сточные воды системы очистки оребренных труб и приводят ее в негодность с

последующей утилизацией всего раствора. В связи с этим, основной целью исследования является снижение объемов сточной воды системы очистки оребренных труб для утилизации путем разделения образовавшейся эмульсии на осадок и осветленную воду, возвращаемую в систему приготовления моющего раствора.

В результате исследования:

1. Установлено, что при применении физического метода, основанного на гравитационном отстаивании и последующей фильтрации через фильтр, не дал положительных результатов по отделению водяной и масляной фракций из сточной воды системы очистки оребренных труб. Сточная вода осталась однородной первоначальной консистенцией.

2. Обнаружено, что при проведении электрохимического метода для эксперимента с использованием алюминиевых электродов образец не изменил характеристик. Результат был отрицательным по причине высокой щелочности сточной воды.

3. Выявлено, что при использовании термического метода нагрева сточной воды системы очистки оребренных труб в термореакторе (Nach LT200) эмульсия не разделилась. В результате увеличения температуры нагрева выше 70 градусов на стенках оборудования и трубах образовывались жировые налеты, в связи, с чем эксперимент в этом направлении был приостановлен из-за риска повреждения технологического оборудования.

4. Метод ультрафильтрации дал положительный результат. Однако данный способ требует использование дорогостоящего оборудования и дальнейшее его регулярного обслуживания, в связи, с чем считается экономически не эффективным методом.

5. Разработан эффективный технологический процесс осветления сточных вод системы очистки оребренных труб с применением физико-химического метода, что подразумевает под собой использование реагентного способа очистки с применением в качестве реагентов кислот. В

результате реagentных обработок обнаружено, что наилучшие показатели были достигнуты при использовании соляной кислоты в соотношении 1:20 к сточной воде.

Полученные результаты химического анализа очищенной воды свидетельствуют об эффективности использованного технологического метода, что позволяет введение водооборота и повторного использования данной воды (ресурсосберегающий метод производства).

3.2 Разработка технологии регенерация отработанного моющего раствора

На основании проведенных исследований и экспериментов с образцом была разработана технология регенерации отработанного моющего раствора.

Таблица 3. Условия применения и основные показатели работы установки

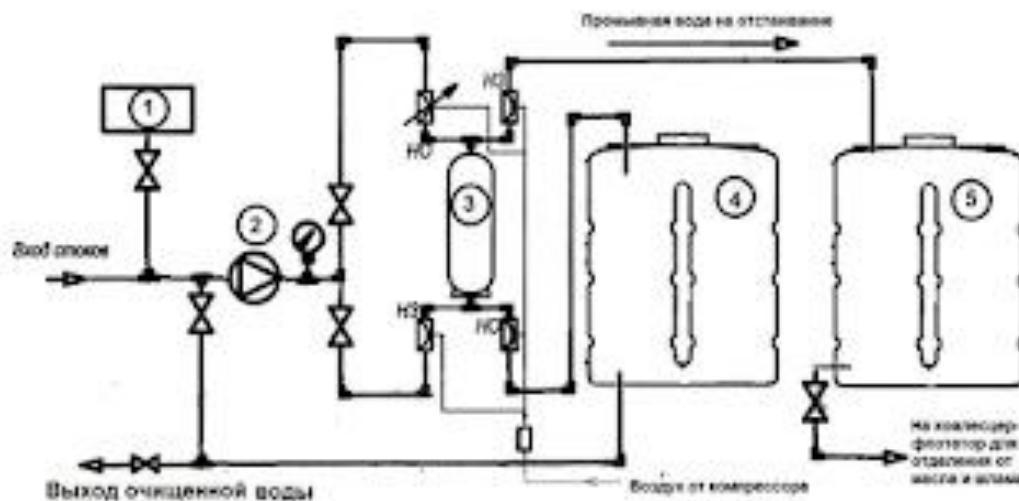
№ п/п	Наименование параметра	Ед.	Значение	
			На входе в Установку	На выходе
1	Температура стока	°С	15-40	15-30
2	рН		10-12	5,5-6,5
3	Гидравлическая нагрузка			
	Суточная	л/сут	600	600
	Номинальная рабочая	л/час	60	60
4	Взвешенные вещества	мг/л	80	5
5	Жиры и жирные кислоты	мг/л	1100	10
6	Ионы алюминия	мг/л	115	0,5

Таблица 4. Технические характеристики установки

№п/п	Наименование параметра	Ед.	Значение
1	Производительность	л/ч	60
2	Давление воды на входе	МПа	не менее – 0,2
3	Давление воды на выходе	МПа	0,1...0,2
4	Температура воды на входе	С	не менее +15 не более +60
5	Мощность, потребляемая от сети	кВт	не более 2 кВт

3.3 Принцип работы установки

В состав оборудования узла очистки входит: 1 – реакгентная емкость с соляной кислотой; 2- насосная станция; 3 – напорный фильтр с загрузкой; 4 – накопительная емкость для осветленной воды; 5 – накопительная емкость для промывных вод после отмывки фильтра от шлама; НО и НЗ нормально открытый и нормально закрытый пневмоклапаны. Технологическая схема представлена на рисунке 15.



1 – реакгентная емкость с соляной кислотой; 2 – насос фильтрации НФ; 3 – засыпной песчаный скорый фильтр; 4 – накопительная емкость для осветленной воды; 5 – накопительная емкость для промывных вод после отмывки фильтра от шлама; НО и НЗ нормально открытый и нормально закрытый пневмоклапаны.

Рисунок 15. Технологическая схема очистки сточных вод системы очистки оребренных труб

3.4 Технология регенерации

Насосной станцией из приемного резервуара сточная вода системы очистки оребренных труб подается на узел фильтрации. Предварительно перед насосной станцией в линию поступает соляная кислота расходом 5 мл/л. Обработанная кислотой сточная вода поступает на напорный фильтр, где в слое фильтрующего материала (гидроантрацит-А фракция 1,8 мм) происходит осаждение выпавших в осадок загрязнений.

Расход фильтрации принимается согласно производительности очистки мощного стана оребренных труб в 60 л/ч. Далее после фильтрации

очищенная вода направляется в накопительную емкость. Из накопительной емкости, пройдя замер рН, очищенная вода направляется на оборотный цикл приготовления моющего раствора. При этом если требуется довести воду к требуемым значениям моющего раствора $pH > 12$, добавляют рН-корректирующий реагент гидроксид натрия в необходимом количестве.

Метод дозирования реагентов в трубопровод перед насосной станцией применен для интенсивного перемешивания до гомогенного состава, а также для упрощения аппаратурной составляющей в виде насоса-дозатора.

В технологической схеме одновременно насосная станция фильтрации является насосной станцией промывки фильтра.

Накопительная емкость очищенной воды предназначена для хранения объема воды на промывку фильтра, а также для обеспечения стабильной работы циркуляционного и насоса фильтрации.

3.5 Фильтрация

Сточная вода, предварительно обработанная кислотой, проходит через НО клапан, поступает в фильтр, проходит через слой фильтрующей среды, очищается от коагулированной эмульсии и взвешенных веществ, после чего через НО клапан подается в накопительную емкость 4 (см. рис. 4). Клапаны НЗ при этом остаются закрытыми.

Режим обратной промывки.

Во время обратной промывки подается воздух в пневмосистему клапанов (распределительное устройство). При этом, клапаны НО закрываются, а клапаны НЗ открываются. Таким образом, перераспределяются потоки жидкости. Вода направляется в нижнюю часть фильтра, разрыхляет слой фильтрующей среды и вымывает задержанные примеси в накопитель.

3.6 Расчет ресурса и определение продолжительности обратной промывки

Реальная емкость фильтрующей среды по удаляемым компонентам (высокомолекулярные жирные кислоты, шлам, взвешенные вещества и т.д.) зависит от множества факторов, таких как: химический состав, температура исходной воды и т.п. Для ориентировочного расчета ресурса осветлителя, в случае если исходная вода отвечает следующим требованиям: температура воды – не выше 60°C, pH – в диапазоне 6.0-7.0, взвешенные вещества – не более 1500 мг/л.

$$P = \frac{V_{\text{сред.л}} * 1,4}{(C_{\text{взв}})_{\text{мг/л}}}, \text{м}^3 \quad (4)$$

где V – объем фильтрующей среды в литрах (без учета объема поддерживающего слоя) для гидроантрацита 100 л,

$C_{\text{взв}}$ – концентрации удаляемых компонентов в мг/л,

1,4 – коэффициент грязеемкости фильтрующего материала (данные по паспорту на фильтрующую загрузку)

$$P = \frac{1000 * 1,4}{1500} = 0,093 \text{ м}^3 = 93 \text{ л}$$

Исходя из фактического образования сточной воды системы очистки оребренных труб в объеме 60 литров в час от обработки труб, получаем расчётное количество промывок засыпного фильтра за 8 часовую рабочую смену:

$$T = \frac{V_{\text{с.в.}}}{P} \quad (5)$$

$$T = \frac{480 \text{ л}}{93 \text{ л}} = 5,16 \text{ раз/сут}$$

Более точно ресурс фильтров отслеживается по изменению их гидравлического сопротивления в режиме фильтрации. В начале фильтроцикла (чистая фильтрующая среда) сопротивление минимально и составляет, как правило, величину порядка 0,2-0,4 бар. Ближе к концу фильтроцикла сопротивление увеличивается до 0,6-0,7 бар. Гидравлическое сопротивление более 0,8 бар, говорит о необходимости обратной промывки.

Фильтрация-это процесс осветления воды, проходящей через пористый материал, на поверхность и в поры которой задерживаются грубые примеси и растворенные металлы. Устройство, в котором производится фильтрация, называется фильтром, а пористый материал, содержащийся в нем, представляет собой фильтрующую среду или фильтрующий материал.

Фильтрация воды происходит под влиянием разности давлений выше и ниже слоя фильтрующего материала. Когда фильтр работает, разница между давлением на фильтр и давлением после фильтра называется потерей давления на фильтрующий слой.

Потеря напора давления в фильтровальном слое зависит от скорости фильтрации, высоты засыпки фильтрующего слоя, фракции фильтрующего материала и степени осаждения его загрязняющих веществ. Увеличение числового значения этих факторов (за исключением фракции) приводит к увеличению потери нагрузки.

После достижения предела загрязнения фильтр исключается из работы и ставится на промывку. При промывке вымываются примеси, удерживаемые фильтрующим слоем во время фильтроцикла. Промытый фильтр снова подключается в работу.

Время работы фильтра между двумя последовательными промывками T называется его рабочим периодом или фильтроциклом. Для эксплуатации желательна наибольшая длительность фильтроцикла.

Грязеемкость (G_p) фильтра - это количество загрязняющих веществ, удерживаемых фильтром за фильтроцикл, равное 1 м³ фильтрующего

материала и выраженного в килограммах. Чем больше грязеемкость для концентрации веществ в воде, тем дольше продолжительность цикла фильтрации[24].

Продолжительность циклов регенерации определяется исходя из условия полного вымывания удаляемых компонентов из слоя фильтрующей среды. Если есть возможность отследить аналитически или визуально содержание нерастворимых взвешенных соединений в промывной воде, то на основании изменения концентрации взвешенных можно достаточно точно определить время обратной промывки фильтров. Фильтр полностью отмыт, когда содержание удаляемых компонентов в промывных водах становится близко их содержанию в исходной воде. Обычно продолжительность обратной промывки составляет 5-10 минут.

Момент работы фильтра, когда потеря напора в фильтрующей загрузке достигает предельно допустимой величины или начинает ухудшаться качество фильтрата, служит сигналом для переключения фильтра в режим промывки, с целью восстановления грязеемкости загрузки, которую производят обратным током фильтрованной воды. Вода подается на промывку промывным насосом из резервуара фильтрованной воды.

Когда происходит потеря нагрузки при фильтрации и достигает максимального допустимого значения или же качество фильтрата начинает ухудшаться, фильтр переводят в режим промывки создаваемой обратным током фильтрованной воды, чтобы восстановить грязеемкость фильтрующего материала. Вода из резервуара для фильтрата воды подается на промывку через насос промывки.

Промывка фильтров является вспомогательным процессом, но это имеет решающее влияние на нормальную работу фильтров. Если загрузка фильтра недостаточно промыта во время промывки, это приводит к постоянному накоплению остаточных загрязнений, что уменьшает цикл фильтрации, а иногда и полностью выводит фильтр из работы. Поэтому

основной целью промывки фильтров является установление такого относительного расширения загрузочного слоя, при котором практически можно полностью очистить загрузочный материал от сгущенных загрязнений во время процесса фильтрации.

При пропускании образца сточной воды системы очистки оребренных труб через слой гидроантрацита в фильтре было установлено, что объем $V_1 = 0,6 \text{ м}^3$ фильтрата образуется через время $t_1 = 24$ часа, а объем $V_2 = 0,06 \text{ м}^3$ фильтрата – через время $t_2 = 1$ час, минимальная общая площадь фильтрования составляет $F = 0,06 \text{ м}^2$. Необходимая суточная производительность фильтра по фильтрату составляет $Q = 0,6 \text{ м}^3$. Необходимо рассчитать длительность часовой работы фильтра.

Определим относительные величины работы фильтра:

$$V_{1F} = V_1/F \quad (6)$$

$$V_{2F} = V_2/F \quad (7)$$

$$V_{1F} = 1/1,16 = 0,62 \text{ м}^3 / \text{м}^2$$

$$V_{2F} = 0,5/1,16 = 0,32 \text{ м}^3 / \text{м}^2$$

Основываясь на данные пробного запуска, составим систему уравнений фильтрования и определим константы фильтрования:

$$\{ [V_{1F}]^2 + 2 * V_{1F} * C = K * t_1 \} \quad (8)$$

$$\{ [V_{2F}]^2 + 0,5 * V_{2F} * C = K * t_2 \} \quad (9)$$

$$\{ [0,62]^2 + 2 * 0,62 * C = K * 1440 \}$$

$$\{ [0,32]^2 + 0,5 * 0,25 * C = K * 960 \}$$

$$\{ K = 16 \}$$

$$\{ C = 1,6 \}$$

Используя найденное уравнение фильтрации, определим искомую величину, подставив в него относительный объем необходимого фильтрата:

$$\left(\frac{16}{1,6}\right)^2 + 2 * \frac{16}{1,6} * 0,62 = 112 * t_{об} \quad (10)$$

где 112 мин = 1,8 часа за один цикл мойки из трех циклов.

Откуда получаем значение $t_{об} = 3 * 1,8 \text{ ч.} = 5,4 \text{ ч.}$ С учетом полной поверхности фильтрования $0,06 \text{ м}^2$.

В результате получаем, что 5,4 часа, время непрерывной работы фильтра до проведения промывки.

Произведем гидравлический расчёт фильтра на основании следующих данных:

- 1) характеристика фильтрующего слоя:
 - материал загрузки – гидроантрацит-А;
 - минимальный диаметр зерен 0,5 мм;
 - максимальный диаметр зерен 1,8 мм;
 - эквивалентный диаметр зерен 0,8 мм;
 - коэффициент неоднородности 1,8-2;
- 2) высота фильтрующего слоя 900 мм;
- 3) расчетная скорость фильтрования 7 м/ч;
- 4) интенсивность промывки принимается в пределах 12-18 л/(с*м²);
- 5) продолжительность промывки соответствует 6-7 минутам.

Общую площадь фильтра, согласно п. 6.98 [1], определяем по формуле

$$F\phi = \frac{Q}{T_{ст} * V_H - n_{пр} * q_{пр} - n_{пр} * \tau_{пр} * V_H} \quad (11)$$

где Q – Суточный объем сточных вод, м³/сут;

T_{ст} – продолжительность работы станции в течении суток, 24 часа;

V_H – расчетная скорость фильтрования, принимаем согласно таблице 21 в СНиП [1] равной 7 м/ч;

$n_{ПР}$ – число промывок одного фильтра в сутки при нормальном режиме эксплуатации;

$\tau_{ПР}$ – время простоя фильтра в связи с промывкой, принимаем для фильтров, промываемых водой 6 часа;

$q_{ПР}$ – удельный расход воды на промывку одного фильтра, $м^3/м^2$, определяем по формуле

$$q_{ПР} = 3,6 * t * w \quad (12)$$

где t – продолжительность промывки;

w - интенсивность промывки, л /($с * м^2$).

$$q_{ПР} = 3,6 * 5 * 0,12 = 2,16 \text{ м}^3/\text{м}^2$$

$$F_{\phi} = \frac{0,6}{24 * 7 - 4 * 2,16 - 4 * 6 * 7} = 0,069 \text{ м}^2$$

Принимается фильтр с размерами 1465”, загрузка фильтра дренажный гравий и гидроантрацит, грязеемкость которого в 2-3 раза выше кварцевого песка аналогичной фракции (1,5 кг/м³ против 0,7 кг/3). Процесс фильтрации осуществляется сверху вниз.

Регенерация фильтрующей загрузки предусматривается промывкой чистой водой после предварительной продувки сжатым воздухом.

Расход фильтруемых сточных вод составляет не более 600 л/сут., что составляет кратковременную работу при 8 часовой смене три цикла замены моющего раствора на 36 штук 12-ти метровых оребренных труб. Площадь фильтрации определяется согласно формуле

$$F_{\phi} = \frac{Q}{V_H} \quad (13)$$

Где v_H – скорость фильтрации при нормальном режиме, согласно таблицы 21 в справочнике [3] $v_H = 5-6$ м/ч;

Q – неравномерный расход сточных вод, 2 м³/ч. При непрерывной 8 часовой работе установки 600 л сточных вод.

Высота фильтрующего слоя для фильтра 1465 равна 900 мм. Расход промывной воды, поступающей в распределительную систему определяется согласно п. 6.110 [1] и формулы

$$q = \omega * F * t_{\text{пр}}, \text{м}^3/\text{ч} \quad (14)$$

где ω – интенсивность промывки, принимается согласно таблицы 23 [1],

$$\omega = 15 \text{ л/с/м}^2;$$

$t_{\text{пр}}$ – время промывки.

$$q = 0,37 \cdot 15 \cdot 0,1 = 0,55 \text{ л/с.}$$

Объём промывных вод составляет:

$$V_{\text{пром.вод}} = q * t_{\text{промывки}} \quad (15)$$

где $t_{\text{промывки}}$ – время промывки фильтра, равное 6 минутам.

$$V_{\text{пром.вод}} = 0,55 \cdot 6 \cdot 60 = 198 \text{ л.}$$

Трубопровод промывной воды, подающий воду к распределительной системе, принимается диаметром 25 мм.

Скорость входа промывной воды принимается согласно п. 6. [1] $1, 1,4$ м/с. Диаметр распределительной трубы в фильтре принимаем равным 25 мм.

Диаметр отводящей трубы принимается 32 мм. Скорость в отводящей трубе $0,71$ м/с.

Вода для регенерации фильтров подается насосом фильтрации, с забором ее из емкости для приема воды от промывки фильтров, сбрасывается обратно в промывную емкость.

Производительность промывных насосов определяется согласно формуле

$$q_{\text{нас}} = w * F * k, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (16)$$

где w – интенсивность промывки, принимается $1,5 \text{ л/с} \cdot \text{м}^2$;

F – площадь фильтра, принимается $0,37 \text{ м}^2$;

k – переводной коэффициент принимается $3,6$.

$$q_{\text{нас}} = 1,5 \cdot 0,37 \cdot 3,6 = 2 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Требуемый напор насосов для регенерации фильтров равен $60 \text{ м. } 0,6 \text{ Мпа}$.

3.7 Обработки осадка

Загрязнения и осадок, образующиеся при промывке фильтрующего материала (рис. 17), уводятся в емкость промывных вод. Далее на утилизацию через коалесцер, в которой отделяется вода от осадка и утилизируется по усмотрению эксплуатации. Утилизация продуктов шлама организуется как готовая смесь для асфальто-битумных производств.

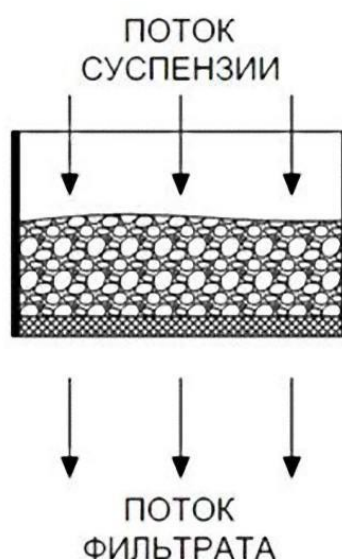


Рисунок 16. Направление потока очищаемой воды при фильтрации

3.8 Требования к привязке

Применяя установку для физико-химической очистки сточной воды системы очистки оребренных труб, необходимо дополнительно решить следующие вопросы:

- механическую очистку сточных вод от крупного мусора;
- равномерную подачу сточных вод на установку;
- ровную площадку под установку;
- выпуск-возврат очищенного стока;
- подведение сетей водоснабжения, водоотведения и электроснабжения.

При необходимости усреднение расхода и концентрации сточных вод, а также предварительную очистку от загрязнений, концентрация которых превышает указанные в опросном листе значения.

Установка устанавливается на ровную площадку с твердым покрытием без перекосов. Опора под установку разрабатывается исходя из местных условий. Максимальная расчетная масса Установки в рабочем состоянии 130 кг.

Для временного складирования отходов перед вывозом их на утилизацию необходимо предусмотреть площадку, ориентированную на объем вывозимого контейнера.

Оборудование должно быть заземлено согласно требованиям ПУЭ.

Вход и выход воды выполнены резьбовыми соединениями или под штуцер для соединения со шлангами.

3.9 Приготовление реагентов

Для эффективной очистки на фильтрах, а также для улучшения структуры и водоотдающих свойств шлама в Установке предусмотрено дозирование товарной неразбавленной соляной кислоты.

Соляная кислота закачивается в расходные емкости в товарном концентрированно виде. При работе необходимо соблюдать меры предосторожности и безопасной работы с кислотами.

Доза подбирается на основании технологических испытаний. Ориентировочные дозы соляной кислоты колеблются в пределах от 5 до 8 мл/л. В технологической модели подача соляной кислоты выполняется всасыванием через трубку перед насосом фильтрации из реакгентной емкости. Регулировка осуществляется вентилем, контроль дозы соляной кислоты по показаниям рН-метра.

3.10 Режим работы установки

Загрузка фильтров произведена в следующей последовательности:

- 1) дренажный гравий
- 2) фильтрующий материал гидроантрацит-А.

Загрузка фильтров производится согласно таблице 5:

Таблица 5 - Количество фильтрующего материала

Наименование фильтра	Название фильтрующего материала	
	Дренажный гравий, фракция 4-6 мм	Гидроантрацит, марки А, фракция 1,8 мм
Фильтр осветления	10 кг	100 кг

После загрузки фильтров необходимо промывать фильтрующий материал в течение 10 минут от пыли.

Контроль объема очищенной сточной воды после установки производится по счетчику, установленному на трубопроводе выхода чистой воды.

3.11 Выводы к третьей главе

1. Установлено, что при применении физического метода, основанного на гравитационном отстаивании и последующей фильтрации через фильтр, не дал положительных результатов по отделению водной и масляной фракций из сточной воды системы очистки оребренных труб. Сточная вода осталась однородной первоначальной консистенцией.

2. Обнаружено, что при проведении электрохимического метода для эксперимента с использованием алюминиевых электродов образец не изменил характеристик. Результат был отрицательным по причине высокой щелочности сточной воды.

3. Выявлено, что при использовании термического метода нагрева сточной воды системы очистки оребренных труб в термореакторе (NachLT200) эмульсия не разделилась. В результате увеличения температуры нагрева выше 70 градусов на стенках оборудования и трубах образовывались жирные налеты, в связи, с чем эксперимент в этом направлении был приостановлен из-за риска повреждения технологического оборудования.

4. Метод ультрафильтрации дал положительный результат. Однако данный способ требует использование дорогостоящего оборудования и дальнейшее его регулярного обслуживания, в связи, с чем считается экономически не эффективным методом.

5. Разработан эффективный технологический процесс осветления сточных вод системы очистки оребренных труб с применением физико-химического метода, что подразумевает под собой использование реагентного способа очистки с применением в качестве реагентов кислот. В результате реагентных обработок обнаружено, что наилучшие показатели были достигнуты при использовании соляной кислоты в соотношении 1:20 к сточной воде.

Полученные результаты химического анализа очищенной воды свидетельствуют об эффективности использованного технологического метода что позволяет введение водооборота и повторного использования данной воды (ресурсосберегающий метод производства).

4 Исследование влияния степени загрязненности оребренной трубы на интенсивность рассеяния лучистой энергии от поверхности

Для исследования влияние степени загрязненности поверхности трубы на интенсивность отражения светового потока от ее поверхности, была взята оребренная биметаллическая труба со следующими техническими характеристиками: коэффициент оребрения $F/F_1 = 9$, материальное исполнение Б1 (материал несущая труба сталь 20, материал оребрения сплав АД1) наружный диаметр оребрения 49 мм, высота ребра (S) 12 мм, толщина ребра (b) 0,6 мм, шаг между ребрами (t) 3,6 мм, наружный диаметр основания (D) 25 мм, толщина стенки трубы 2 мм.

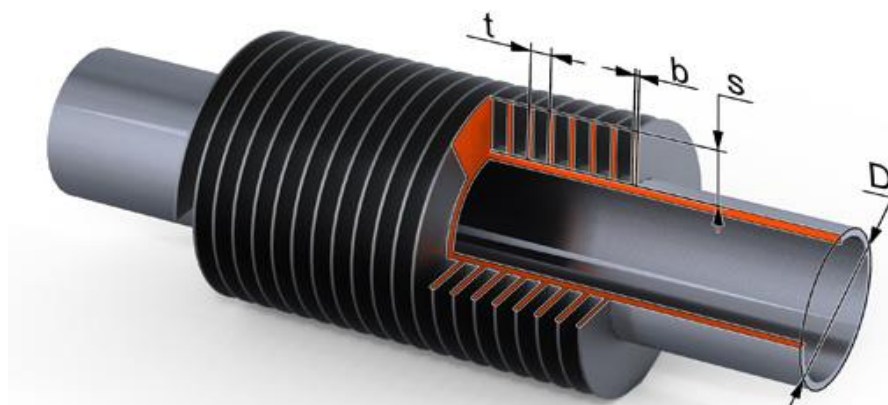


Рисунок 17. Оребренная биметаллическая труба

Оребренная биметаллическая труба данного типа изготавливается методом поперечно-винтовой прокатки дисковым инструментом на стане ХПРТ.

При накатке рёбер для смазки и охлаждения накатного инструмента применяется эмульсол “Ленол-32” и водная эмульсия на основе синтетической смазки. В состав эмульсии Ленол-32 в процентном соотношении входят: композиция жировая - 32; масло минеральное - 22; деэмульгатор нефтяных эмульсий - 20; вспомогательное вещество ОП-Ю -

10; полигликоль - 11; присадка ОТП - 3; вода для стабилизации эмульсола - 2%.

Наиболее распространенным и активным элементом, который включают в состав СОЖ, является хлор. В качестве хлорсодержащих присадок наиболее распространены хлорированные углеводороды.

В таблице 6 представлен химический состав элементов в процентном соотношении основание трубы и его оребрения.

Таблица 6. Химический состав в процентном соотношении элементов в оребренной биметаллической трубы

Элемент	Химический состав в % стали марки Б20(основание трубы)	Химический состав в % сплава АД1(оребрение)
1	2	3
C	0,17-0,24	-
Si	0,17-0,37	до 0,3
Mn	0,35 - 0,65	до 0,025
Ni	до 0,25	-
S	до 0,04	-
P	до 0,04	-
Cr	до 0,25	-
Cu	до 0,25	до 0,05
As	до 0,08	-
Fe	~98	до 0,3
Ti	-	до 0,15

Продолжение таблицы 6.

1	2	3
Al	-	99,3
Mg	-	до 0,05
Zn	-	до 0,1

4.1 Подготовка экспериментальных образцов

Из одной изготовленной трубы было получено n количество образцов длиной 270 мм. которые подвергались процессу очистки на специально разработанном стенде очистки оребренных труб. Для каждого образца трубы были заданы различные режимы процесса очистки щелочным раствором каустической соды. Варьируемыми параметрами были температура раствора и водородный показатель РН, характеризующий его меру кислотности. Постоянными параметрами были период вращения трубы вокруг своей оси, скорость подачи трубы и напор жидкости, подаваемый на поверхность трубы. В таблице представлены режимы очистки образцов.

Таблица 7. Режимы очистки образцов

Образец	Идентификационный номер	Режимы очистки оребренной трубы	
		температура раствора (С)	водородный показатель (РН)
1	2	3	4
1	0000	Не подвергался процессу очистки	
2	3011	30	11
3	4011	40	11

Продолжение таблицы 7.

1	2	3	4
4	5011	50	11
5	6011	60	11
6	3012	30	12
7	4012	40	12
8	5012	50	12
9	6012	60	12

4.2 Очистка образцов на экспериментальном стенде.

Для получения образцов оребренных биметаллических труб с различной изготовлен экспериментальный стенд очистки образцов оребренных биметаллических труб, принцип действия, которого основан на подаче моющего раствора на поверхность трубы под давлением. Температура раствора и водородный показатель pH варьируются в зависимости от режима очистки для каждого отдельного образца с целью получить различные степени загрязненности поверхностей.

Стенд содержит емкость (1) выполненную из полиметилметакрилата в которой циркулирует раствор с помощью погружного вибрационного насоса (2), металлического профильного каркаса (3) на котором размещены колесные опоры (4) для передвижения емкости по профильным направляющим (5). Механическая часть стенда включает в себя электродвигатель (6), реализующий линейное движение емкости, электродвигатель (7) реализующий вращение специального вала (8) на который вдевается образец (9). Подача раствора на поверхность осуществляется через распределительный коллектор(10) в который

вмонтированы конические насадки (11) обеспечивающие плоскую форму струи. Фиксация образца осуществляется резиновыми коническими пробками (12).

Вращение образца и его линейное перемещение при очистке поверхности соответствует производственным режимам стана ХПРТ.

Экспериментальный стенд работает следующим образом. Образец оребренной трубы установленный на вал (8) совершая вращательное движение, в емкости (1), в которой подвергается воздействию моющего раствора. Моющий раствор подогретый с помощью трубчатого нагревателя (12) до температуры, необходимой в соответствии с режимом очистки, подается вибрационным насосом (2) в распределительный коллектор (10), где проходя через отверстия в конических насадках (11), формируясь в плоский турбулентный поток моющего раствора, удаляющий загрязнения с поверхности образца и межреберного пространства. Поступательное движение реализуется линейным перемещением емкости (1), установленной в профильном каркасе (3). Электродвигатель (6) с помощью ременной передачи придает вращательное движение резьбовому штифту. Втулка с внутренней резьбой, установленной на профильном каркасе, перемещается по резьбе штифта, вследствие чего профильный каркас катится по направляющим (5) с помощью колесных опор (4).

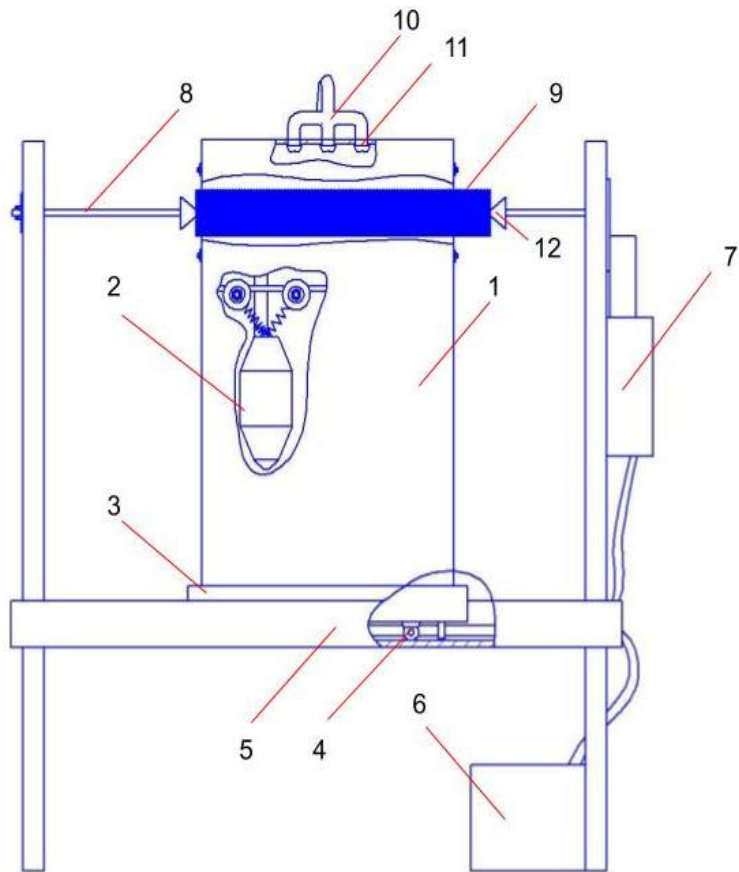


Рисунок 18. Конструкция экспериментального стенда очистки образцоворезбренных биметаллических труб

Ход работы на экспериментальном стенде:

1. Заполнение сетевой водой емкости стенда;
2. Нагрев раствора до требуемой температуры;
3. Добавление каустической соды до требуемого показателя pH;
4. Пуск вращения вала с образцом;
5. Одновременный пуск насоса и линейное перемещение корпуса вперед;
6. Остановка насоса;
7. Возврат корпуса в исходное положение;
8. Изъятия образца;

Измерение температуры и показателя РН раствора реализовывалось измерительными приборами, представленными в таблице 8.

Таблица 8. Измерительные приборы

№	Наименование	Назначение	Технические характеристики
1	Модуль: DS18B20	Измерение температуры раствора	Диапазон измеряемых температур: -55...+125 °С Точность: ±0,5°С
2	РН-метр: Kelilong PH-009	Измерение водородного показателя раствора	Диапазон измерения РН: 00 – 14 Температура измеряемой среды: 0 – 70°С Точность: ±0,1РН

В результате эксперимента образцам были присвоены id номера которые характеризуют параметры моющего раствора. Визуально полученные образцы, представленные на рисунке 19, можно условно разделить на три группы, соответствующие степени загрязненности.

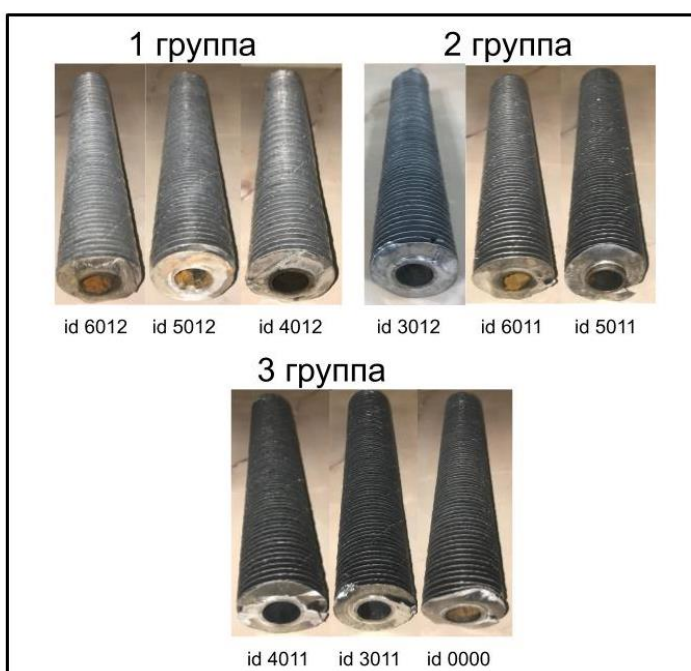


Рисунок 19. Полученные экспериментальные образцы

Оценка образцов данным способом является субъективной мерой и не дает количественные характеристики, позволяющие выстраивать регрессионные зависимости. В связи с этим возникла актуальная задача для разработки методов оценки загрязненности поверхности трубы позволяющих дать количественную оценку, что в тоже время позволит оптимизировать технологию очистки оребренных труб в производственном процессе.

4.3 Количественная оценка загрязненности поверхности экспериментальных образцов

В результате проектирования компьютерной модели процесса отражения светового потока от поверхности трубы, были выявлены зоны наиболее плотного формирования отраженного света лежащей на одной плоскости с источником света. В связи с этим источник лучистой энергии и световой датчик были размещены на расстоянии 6 мм в одной плоскости на поверхности внутренней стенки верхней крышки.

Площадь луча, подаваемого на плоскую поверхность на расстоянии 16мм от источника лучистой энергии, равняется 25мм².

На рисунке 20 изображена компьютерная модель процесса отражения светового потока от поверхности трубы, красном цветом обозначены исходящие лучи от источника, а синим цветом отраженные лучи.

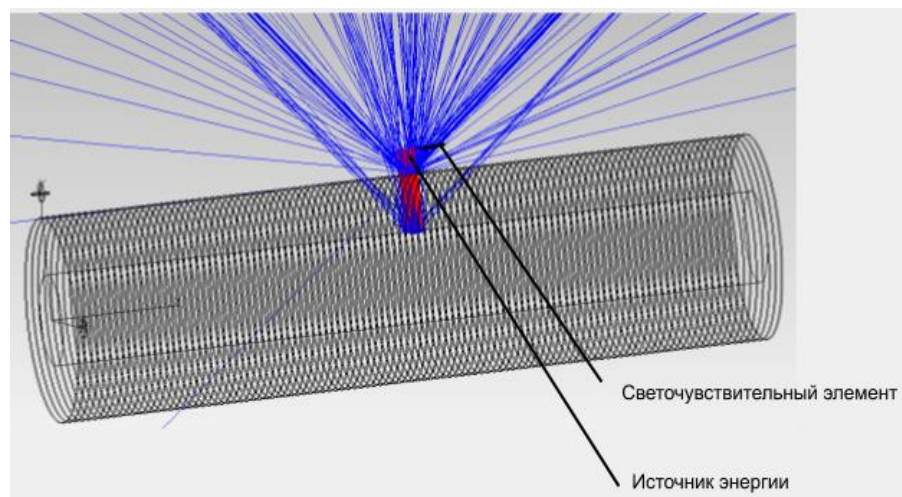


Рисунок 20. Компьютерная модель процесса отражения лучистой энергии от поверхности

Для создания экспериментального стенда оценки загрязненности поверхности образцов было взято свойство поверхностей тел рассеивать световую энергию. Часть энергии, падающей на поверхность, рассеивается во всех направлениях, а установленный рядом с источником лучистой энергии параллельно поверхности трубы, светочувствительное устройство фиксирует интенсивность отраженного света.

Чем интенсивней свет, тем больше создается свободных носителей зарядов и тем меньше становится сопротивление элемента. Два внешних металлических контакта фоторезистора идут через керамический материал основания к светочувствительной пленке, которая по своей геометрии и свойству материала определяет электрические свойства сопротивления. Так как фоточувствительный материал имеет большое сопротивление, то между электродами с тонкой извилистой дорожкой, при средней интенсивности света, получается низкое общее сопротивление элемента. Микроконтроллер преобразовывает получаемый сигнал в битовое значение и конвертирует его в единицу Люкс.

Подавая на поверхность трубы световую энергию под углом 90 градусов к ее основанию, принимаем и фиксируем отраженные лучи которые

характеризуют интенсивность отраженной энергии, в единицах Люкс. На рисунке 21 изображена принципиальная схема устройства.

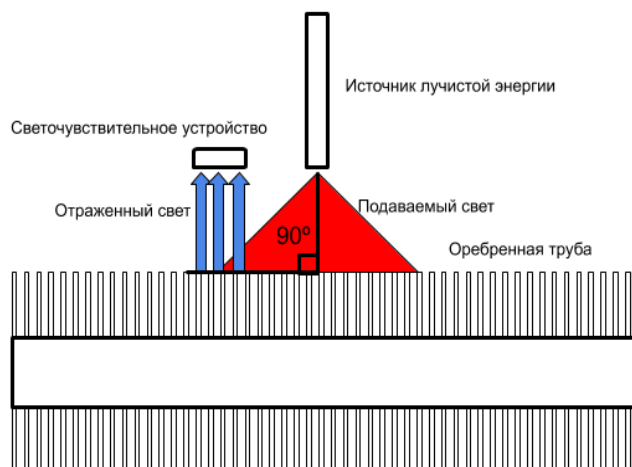


Рисунок 21. Принципиальная схема экспериментального стенда оценки загрязненности поверхности образцов

Экспериментальный стенд оценки загрязненности поверхности образцов оребренных труб включает в себя: корпус (1) с размерами 300×86×68, верхнюю крышку (2), печатную электронную плату (4).

Верхняя крышка стенда выполнена в форме цилиндра (2), вмонтированного в прямоугольную планку (3) по размеру, равном ширине внутреннего пространства корпуса, что обеспечивает фиксацию светочувствительного устройства на определенном расстоянии от поверхности образца и обеспечивает подачу светового луча под углом 90° градусов к его оси, как это изображено на рисунке 21.

Источник лучистой энергии и датчик вмонтированы в печатную электронную плату (4) внутри цилиндра на расстоянии 16 мм от поверхности трубы. Данное конструктивное исполнение крышки стенда исключает попадания на него световых лучей от внешнего источника. Внутренние стенки корпуса снабжены планками (5), которые являются ограничителями и

направляющими для цилиндра. Конструкция станда представлена на рисунке 22.

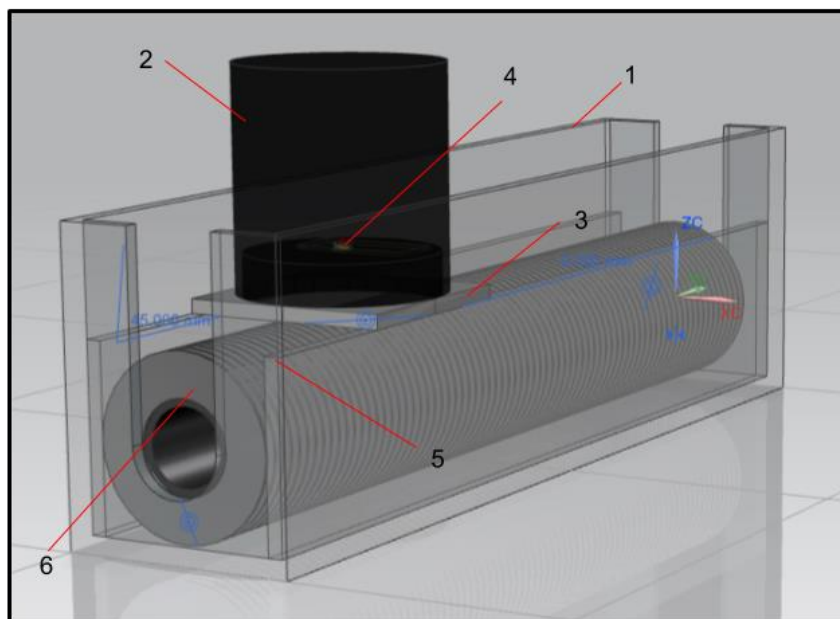


Рисунок 22. Конструкция экспериментального станда оценки загрязненности поверхности образцов

Экспериментальный станд оценки загрязненности поверхности образцов работает следующим образом. В корпус (1) помещается образец (6), где накрывается крышкой (2), которая перемещается вдоль оси ребренной трубы для измерения по все ее длине.

Электротехническая часть станда оценки загрязненности поверхности образцов устроена следующим образом. Испускаемый лазерным диодом (1) луч, отражаясь от поверхности трубы попадает на фотоэлемент (2), что активирует электроны и световая энергия преобразуется в электрическую. Электрический сигнал по последовательной шине I2C передается в программируемый контроллер (3), где значение конвертируется в единицу измерения выраженную в люксах и записывается в оперативную память. Значение переменной, присвоенной для хранения данных в адресном

пространстве, передается по последовательной шине USB в компьютер (4) и выводится на виртуальный COM порт (5) по стандарту RS-232

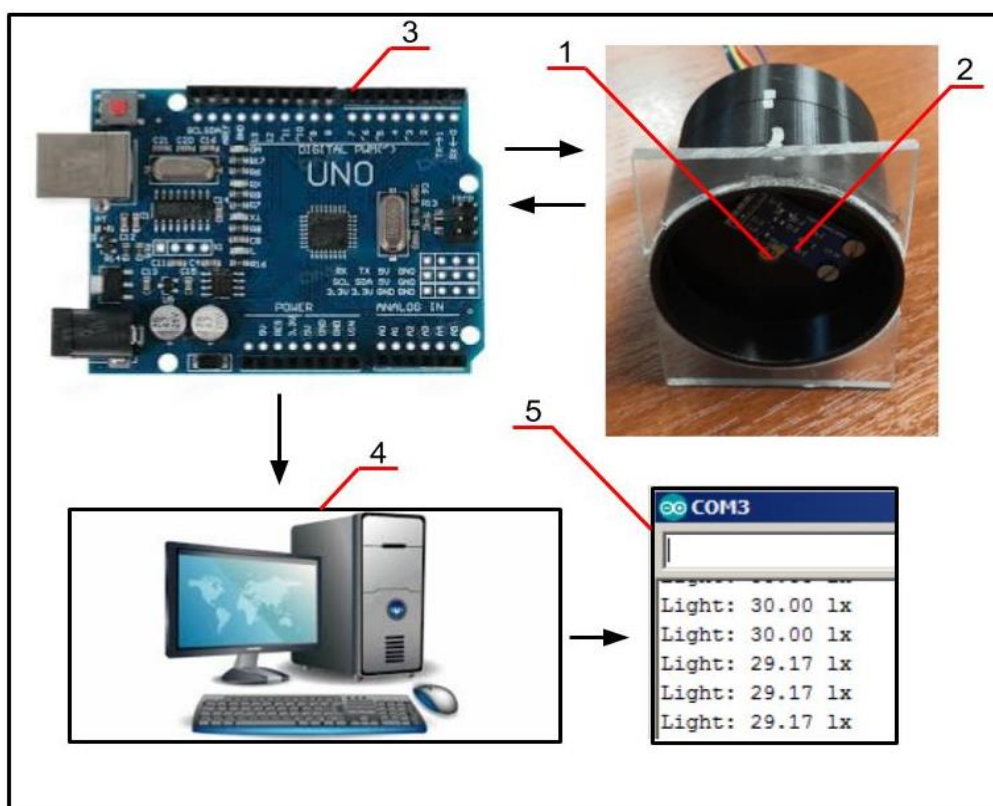


Рисунок 23. Принципиальная схема функционирования электротехнической части стенда оценки загрязненности поверхности образцов

Таблица 9. Электронные компоненты устройства

№	Наименование	Назначение	Технические характеристики
1	2	3	4
1	Датчик GY-302 на базе BH1750	Измерение интенсивности отраженного света	Чувствительность: 65536 градаций Точность: 1 люкс
2	ZT-T601, Лазерный модуль	Генерация световой волны	Длина волны, (нм): 650

Продолжение таблицы 9.

1	2	3	4
3	Микроконтроллер ArduinoUno	Обработка сигналов и вывод данных	Тактовая частота: 16 МГц Разрядность АЦП: 10 бит Flash-память: 32 КБ EEPROM-память: 1 КБ Оперативная память: 2 КБ

Датчик GY-302 на базе BH1750 представляет собой цифровой 16-битный цифровой датчик освещённости, что задаёт диапазон его измерений: от 1 до 65535 люкс. Подключение модуля производится по двухпроводному интерфейсу I2C, а питание осуществляется от +5 В. Интерфейс I2C в платах Arduino реализован на аналоговых пинах A4 и A5, которые отвечают за SDA (шина данных) и SCL (шина тактирования), соответственно. Схема подключения лазерного модуля и датчика GY-302 представлена на рисунке 24.

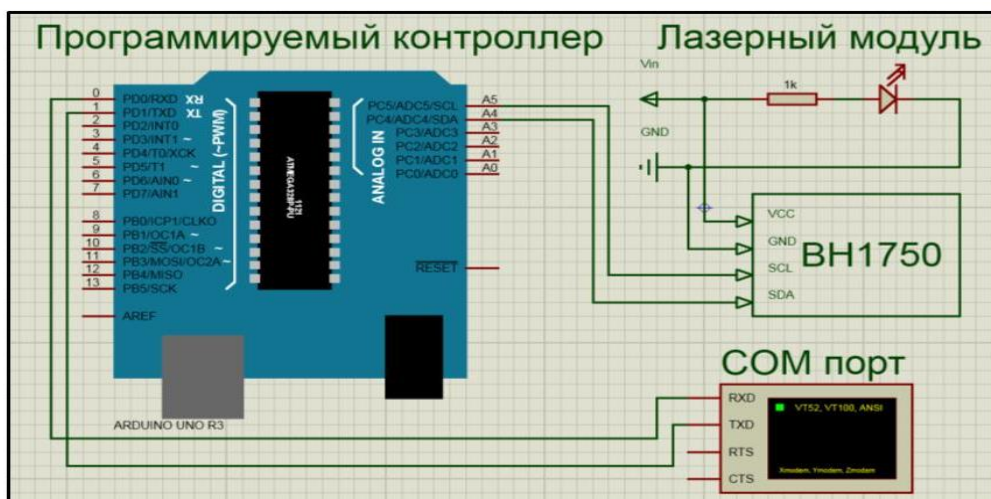


Рисунок 24. Электрическая схема стенда оценки загрязненности поверхности образцов

Полученные в результате процесса очистки образцы помещались в экспериментальный стенд оценки загрязненности для измерения интенсивности отражения световых лучей от поверхности. Каждый образец измерялся в десяти случайных точках по всей длине поверхности трубы. Экспериментальные данные были сформированы в таблицу для их дальнейшего анализа.

Таблица 10. Экспериментальные данные, характеризующие интенсивность световых лучей отраженных от поверхности образцов.

Режим очистки	ID	Наблюдения									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0000	20	23	19	22	18	16	22	21	16	22
2	3011	18	20	17	25	18	19	22	24	23	25
3	4011	18	23	27	19	24	27	21	24	24	21
4	5011	30	33	31	20	29	24	28	29	19	24
5	6011	28	27	31	26	35	31	28	27	32	26
6	3012	45	50	52	48	52	43	48	40	39	50
7	4012	46	45	47	44	46	53	44	58	44	49
8	5012	53	58	62	49	58	65	64	59	55	54
9	6012	62	60	58	65	63	59	58	53	64	53

4.4 Анализ экспериментальных данных

Для выявления зависимости режима очистки от полученных значений был применен однофакторный дисперсионный анализ. Выдвинута нулевая статистическая гипотеза о том, что не существует зависимой связи между полученными значениями и классами градаций факторов. При определенной

корреляции между исследуемыми переменными данная гипотеза отклоняется при условии, что фактическое значение Фишера будет больше критического значения соответствующего распределения при заданном уровне значимости.

Число классов градации фактора (групп) $a = 9$ и в каждом классе (группе) $n_i = 10$ наблюдений. Общее число наблюдений $n = 90$. Числа степеней свободы, объясненной (va), необъясненной (ve) дисперсии, а также общее число степеней свободы (v) находим по формулам:

$$va = a - 1 \quad (17)$$

$$ve = n - a \quad (18)$$

$$v = n - 1 \quad (19)$$

$$va = 9 - 1 = 8$$

$$ve = 90 - 9 = 81$$

$$v = 90 - 1 = 89$$

Находим внутригрупповые средние величины по формуле:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{x_i} X_j \quad (20)$$

$$\bar{X}_1 = \frac{20 + 23 + 19 + 22 + 18 + 16 + 22 + 21 + 16 + 22}{10} = 19,9$$

$$\bar{X}_2 = \frac{18 + 20 + 17 + 25 + 18 + 19 + 22 + 24 + 23 + 25}{10} = 21,1$$

$$\bar{X}_3 = \frac{18 + 23 + 27 + 19 + 24 + 27 + 21 + 24 + 24 + 21}{10} = 22,8$$

$$\bar{X}_4 = \frac{30 + 33 + 31 + 20 + 29 + 24 + 28 + 29 + 19 + 24}{10} = 26,7$$

$$\bar{X}_5 = \frac{28 + 27 + 31 + 26 + 35 + 31 + 28 + 27 + 32 + 26}{10} = 29,1$$

$$\bar{X}_6 = \frac{45 + 50 + 52 + 48 + 52 + 43 + 48 + 40 + 39 + 50}{10} = 46,7$$

$$\bar{X}_7 = \frac{46 + 45 + 47 + 44 + 46 + 53 + 44 + 58 + 44 + 49}{10} = 47,6$$

$$\bar{X}_8 = \frac{53 + 58 + 62 + 49 + 58 + 65 + 64 + 59 + 55 + 54}{10} = 57,7$$

$$\bar{X}_9 = \frac{62 + 60 + 58 + 65 + 63 + 59 + 58 + 53 + 64 + 53}{10} = 59,5$$

Находим общую среднюю величину по формуле:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}}{n} \quad (21)$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{19,9 + 21,1 + 22,8 + 26,7 + 29,1 + 46,7 + 47,6 + 57,7 + 59,5}{9} = 36,78$$

Находим суммы квадратов отклонения где:

SS - общая сумма квадратов отклонений

SS_a - объясненная влиянием фактора (a) сумма квадратов отклонений,

SS_e - необъясненная(остаточная) сумма квадратов отклонений или сумма квадратов отклонений ошибки.

Через (n_i) обозначаем число наблюдений в каждом режиме очистки и (a) - общее число режимов очистки, то $\sum_{i=1}^a n_i = n$ - общее число наблюдений, тогда:

$$SS = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{\bar{X}})^2 \quad (22)$$

$$SS_a = \sum_{i=1}^a n_i (X_i - \bar{\bar{X}})^2 \quad (23)$$

$$SS_b = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (24)$$

Находим внутригрупповые дисперсии по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_1 - 1} \quad (25)$$

$$S_1^2 = \frac{(20 - 19,9)^2 + (23 - 19,9)^2 + (19 - 19,9)^2 + (22 - 19,9)^2 + (18 - 19,9)^2 + (16 - 19,9)^2 + (22 - 19,9)^2 + (21 - 19,9)^2 + (16 - 19,9)^2 + (22 - 19,9)^2}{10 - 1} = 6,54$$

$$S_2^2 = \frac{(18 - 21,1)^2 + (20 - 21,1)^2 + (17 - 21,1)^2 + (25 - 21,1)^2 + (18 - 21,1)^2 + (19 - 21,1)^2 + (22 - 21,1)^2 + (24 - 21,1)^2 + (23 - 21,1)^2 + (25 - 21,1)^2}{10 - 1} = 9,43$$

$$S_3^2 = \frac{(18 - 22,8)^2 + (23 - 22,8)^2 + (27 - 22,8)^2 + (19 - 22,8)^2 + (24 - 22,8)^2 + (27 - 22,8)^2 + (21 - 22,8)^2 + (24 - 22,8)^2 + (24 - 22,8)^2 + (21 - 22,8)^2}{10 - 1} = 9,28$$

$$S_4^2 = \frac{(30 - 26,7)^2 + (33 - 26,7)^2 + (31 - 26,7)^2 + (20 - 26,7)^2 + (29 - 26,7)^2 + (24 - 26,7)^2 + (28 - 26,7)^2 + (29 - 26,7)^2 + (19 - 26,7)^2 + (24 - 26,7)^2}{10 - 1} = 22,45$$

$$S_5^2 = \frac{(28 - 29,1)^2 + (27 - 29,1)^2 + (31 - 29,1)^2 + (26 - 29,1)^2 + (35 - 29,1)^2 + (31 - 29,1)^2 + (28 - 29,1)^2 + (27 - 29,1)^2 + (32 - 29,1)^2 + (26 - 29,1)^2}{10 - 1} = 8,98$$

$$S_6^2 = \frac{(45 - 46,7)^2 + (50 - 46,7)^2 + (52 - 46,7)^2 + (48 - 46,7)^2 + (52 - 46,7)^2 + (43 - 46,7)^2 + (48 - 46,7)^2 + (40 - 46,7)^2 + (39 - 46,7)^2 + (50 - 46,7)^2}{10 - 1} = 22,45$$

$$S_7^2 = \frac{(46 - 47,6)^2 + (45 - 47,6)^2 + (47 - 47,6)^2 + (44 - 47,6)^2 + (46 - 47,6)^2 + (53 - 47,6)^2 + (44 - 47,6)^2 + (58 - 47,6)^2 + (44 - 47,6)^2 + (49 - 47,6)^2}{10 - 1} = 21,15$$

$$S_8^2 = \frac{(53 - 57,7)^2 + (58 - 57,7)^2 + (62 - 57,7)^2 + (49 - 57,7)^2 + (58 - 57,7)^2 + (68 - 57,7)^2 + (64 - 57,7)^2 + (59 - 57,7)^2 + (55 - 57,7)^2 + (54 - 57,7)^2}{10 - 1} = 21,15$$

$$S_9^2 = \frac{(62 - 59,5)^2 + (60 - 59,5)^2 + (58 - 59,5)^2 + (65 - 59,5)^2 + (63 - 59,5)^2 + (59 - 59,5)^2 + (58 - 59,5)^2 + (53 - 59,5)^2 + (64 - 59,5)^2 + (53 - 59,5)^2}{10 - 1} = 21,15$$

Находим объясненную влиянием фактора (а) сумму квадратов отклонений:

$$SS_a = 10 \times (19,9 - 36,8)^2 + 10 \times (21,1 - 36,8)^2 + 10 \times (22,8 - 36,8)^2 + 10 \times (26,7 - 36,8)^2 + 10 \times (29,1 - 36,8)^2 + 10 \times (46,7 - 36,8)^2 + 10 \times (47,6 - 36,8)^2 + 10 \times (57,7 - 36,8)^2 + 10 \times (59,5 - 36,8)^2 = 20561,4$$

Находим необъясненную сумму квадратов отклонений по формуле:

$$SS_b = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^a (n_i - 1)s_i^2 = (n_1 - 1)s_1^2 + \dots + (n_a - 1)s_a^2 \quad (26)$$

$$SS_c = (10 - 1) \times 6,54 + (10 - 1) \times 9,43 + (10 - 1) \times 9,28 + (10 - 1) \times 22,23 + (10 - 1) \times 8,98 + (10 - 1) \times 22,45 + (10 - 1) \times 21,15 + (10 - 1) \times 25,78 + (10 - 1) \times 17,61 = 12,9$$

Общая сумма квадратов отклонения можно найти, сложив объясненную сумму квадратов отклонения (SS_a) и необъясненную сумму квадратов отклонения (SS_c).

$$SS = SS_a + SS_b \quad (27)$$

$$SS = 20561,49 + 1291,5 = 21852,99$$

Чтобы провести однофакторный дисперсионный анализ данных статистического комплекса, нужно найти фактическое отношение Фишера - отношение дисперсии, объясненной влиянием фактора (межгрупповой), и

необъяснённой дисперсии (внутригрупповой) и сравнить его с критическим значением Фишера.

Находим дисперсию, объясненную влиянием фактора по формуле:

$$MS_a = \frac{SS_a}{a - 1} \quad (28)$$

$$MS_a = \frac{20561,49}{8} = 2570,186$$

Находим внутригрупповую дисперсию (необъясненную) по формуле:

$$MS_b = \frac{SS_b}{n - a} \quad (29)$$

$$MS_b = \frac{1291,5}{81} = 15,94$$

Находим фактическое отношение Фишера по формуле:

$$F = \frac{MS_a}{n - a} \quad (30)$$

$$F = \frac{2570,168}{15,94} = 161,1$$

Критическое значение отношения Фишера с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ и известными степенями ($\nu_a = 8$, $\nu_b = 81$) находим в статистической таблице Фишера.

$$F_{0,05;8;81} = 2,054$$

Исходя из того, что фактическое значение отношения Фишера больше критического отношения $F > F_{0,05;8;81}$, делаем вывод, что с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ или с вероятностью в 95% процентов режим очистки образцов оребренных труб существенно влияет на интенсивность световой лучистой энергии, отраженной от поверхности, что в свою очередь говорит о

том что имеется возможность давать количественную оценку степени загрязненности поверхностей образцов применяя данный метод.

Следующим этапом необходимо установить характер взаимосвязи управляемых параметров режимов очистки и построить регрессионную модель.

Для реализации многофакторного анализа была сформирована таблица, где средние значения полученных от каждого экспериментального образца данных соответствовало значениям управляемых факторов установленного режима очистки.

Таблица 11. Средние значения экспериментальных данных

Среднее значение интенсивности отражения (Люкс)	Температура раствора	Водородный показатель (PH)
21,125	30	11
22,875	40	11
26,75	50	11
29,125	60	11
46,75	30	12
47,625	40	12
57,75	50	12
59,5	60	12

Уравнение множественной регрессии будет иметь вид:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon \quad (31)$$

где $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ - вектор независимых (объясняющих) переменных; β - вектор параметров (подлежащих определению); ε - случайная ошибка (отклонение); Y - зависимая (объясняемая) переменная.

Теоретическое линейное уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (32)$$

Где β_0 - свободный член, определяющий значение Y , в случае, когда все объясняющие переменные X_j равны 0.

По методу наименьших квадратов устанавливаем следующие предпосылки:

1. $(M(\varepsilon_i) = 0)$.
2. $D(\varepsilon_i) = D(\varepsilon_j) = S^2$
3. Мультиколлинеарность отсутствует
4. Автокорреляция отсутствует
5. Ошибки ε_i имеют нормальное распределение

где ε_i - случайное отклонение

Эмпирическое уравнение множественной регрессии будет иметь вид

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_1 X_1 + \dots + b_m X_m + e \quad (33)$$

Где b_0, b_1, \dots, b_m - оценки теоретических значений $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ коэффициентов регрессии; e - оценка отклонения ε .

Согласно МНК, вектор $s = (X^T X)^{-1} X^T Y$.

К матрице X_j добавляем единичный столбец:

Таблица 12. Матрица X_j

1	30	11
1	40	11

1	50	11
1	60	11
1	30	12
1	40	12
1	50	12
1	60	12

Таблица 13. Матрица Y

21.125
22.875
26.75
29.125
46.75
47.625
57.75
59.5

Таблица 14. Матрица X^T

1	1	1	1	1	1	1	1
30	40	50	60	30	40	50	60
11	11	11	11	12	12	12	12

Произведение матриц, (X^TX)

$$X^T X = \begin{vmatrix} 8 & 360 & 92 \\ 360 & 17200 & 4140 \\ 92 & 4140 & 1060 \end{vmatrix}$$

Произведение матриц, $(X^T Y)$

$$X^T Y = \begin{vmatrix} 311,5 \\ 14398,75 \\ 3638,125 \end{vmatrix}$$

Произведение матриц, $(X^T X)^{-1}$

$$(X^T X)^{-1} = \begin{vmatrix} 68,275 & -0,045 & -5,75 \\ -0,045 & 0,001 & 0 \\ -5,75 & 0 & 0,5 \end{vmatrix}$$

Вектор оценок коэффициентов регрессии

$$Y(X) = \begin{vmatrix} 68,275 & -0,045 & -5,75 \\ -0,045 & 0,001 & 0 \\ -5,75 & 0 & 0,5 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 311,5 \\ 14398,75 \\ 3638,125 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -299,5 \\ 0,381 \\ 27,938 \end{vmatrix}$$

Уравнение регрессии:

$$Y = -299.5 + 0.3813X_1 + 27.9375X_2 \quad (34)$$

При двух видах независимых переменных и восьми наблюдений с учетом признака Y , матрица будет иметь размерность $8*4$.

Таблица 15. Матрица А (из Y и X)

1	21,125	30	11
1	22,875	40	11
1	26.75	50	11

1	29.125	60	11
1	46.75	30	12
1	47.625	40	12
1	57.75	50	12
1	59.5	60	12

Таблица 16. Транспонированная матрица

1	1	1	1	1	1	1	1
21,125	22,875	26.75	29.125	46.75	47.625	57.75	59.5
30	40	50	60	30	40	50	60
11	11	11	11	12	12	12	12

Таблица 17. Матрица ХТХ

8	311,5	360	92
311,5	13862.375	14398.75	3638.125
360	14398.75	17200	4140
92	3638.125	4140	1060

Таблица 18. Соответствие полученной матрицы

$\sum n$	$\sum y$	$\sum x_1$	$\sum x_2$
$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum x_1 y$	$\sum x_2 y$
$\sum x_1$	$\sum y x_1$	$\sum x_1^2$	$\sum x_2 x_1$

$\sum x_2$	$\sum yx_2$	$\sum x_1 x_2$	$\sum x_2^2$
------------	-------------	----------------	--------------

Определяем парные коэффициенты корреляции по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{x * y} - \bar{x} * \bar{y}}{s(x) * s(y)} \quad (35)$$

$$r_{xy_1} = \frac{1799,844 - 45 * 38,938}{11,18 * 14,72} = 0,29$$

$$r_{xy_2} = \frac{454,766 - 11,5 * 38,938}{0,5 * 14,72} = 0,949$$

$$r_{x_1 y_2} = \frac{517,5 - 11,5 * 45}{0,5 * 14,72} = 0$$

Таблица 19. Коэффициенты корреляции

Признаки x и y	$\sum x_i$	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$	$\sum y_i$	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$	$\sum x_i \cdot y_i$	$\overline{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n}$
Для y и x ₁	360	45	311.5	38.938	14398.75	1799.844
Для y и x ₂	92	11.5	311.5	38.938	3638.125	454.766
Для x ₁ и x ₂	92	11.5	360	45	4140	517.5

Таблица 20. Дисперсии и среднеквадратические отклонения

Признаки x и y	$D(x) = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2$	$D(y) = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2$	$s(x) = \sqrt{D(x)}$	$s(y) = \sqrt{D(y)}$
Для y и x ₁	125	216.668	11.18	14.72

Для y и x ₂	0.25	216.668	0.5	14.72
Для x ₁ и x ₂	0.25	125	0.5	11.18

Таблица 21. Матрица парных коэффициентов корреляции R

-	y	x ₁	x ₂
y	1	0.2896	0.949
x ₁	0.2896	1	0
x ₂	0.949	0	1

Определяем частные коэффициенты корреляции, на основании которых заключаем обоснованность включения переменных в модель по следующей формуле:

$$r_{yx_1/x_2} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx_2} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{(1 - r_{yx_2}^2)(1 - r_{x_1x_2}^2)}} \quad (36)$$

$$r_{yx_1/x_2} = \frac{0,29 - 0,949 \cdot 0}{\sqrt{(1 - 0,949^2)(1 - 0^2)}} = 0,918 \quad \text{— сильная положительная теснота}$$

СВЯЗИ

$$r_{yx_2/x_1} = \frac{r_{yx_2} - r_{yx_1} \cdot r_{x_2x_1}}{\sqrt{(1 - r_{yx_1}^2)(1 - r_{x_2x_1}^2)}} \quad (37)$$

$$r_{yx_2/x_1} = \frac{0,949 - 0,29 \cdot 0}{\sqrt{(1 - 0,29^2)(1 - 0^2)}} = 0,991 \quad \text{— сильная положительная теснота}$$

СВЯЗИ

$$r_{y_{x_2}/x_1} = \frac{r_{x_1 x_2} - r_{x_1 y} - r_{x_2 y}}{\sqrt{(1 - r_{x_1 y}^2)(1 - r_{x_2 y}^2)}} \quad (38)$$

$$r_{y_{x_2}/x_1} = \frac{0 - 0,29 * 0,949}{\sqrt{(1 - 0,29^2)(1 - 0,949^2)}} = -0,991 \text{ – сильная отрицательная теснота}$$

связи

Проверим переменные на мультиколлинеарность виду статистических критериев (критерий Фишера).

Определяем обратную матрицу $D = R^{-1}$:

$$D = \begin{vmatrix} 64,235 & -18,601 & -60,958 \\ -18,601 & 6,387 & 17,652 \\ -60,958 & 17,652 & 58,849 \end{vmatrix}$$

Вычисляем F-критерии Фишера:

$$F_k = (d_{kk} - 1) \frac{n - m}{m - 1} \quad (39)$$

где d_{kk} - диагональные элементы матрицы.

Рассчитанные значения критериев сравниваются с табличными при $v_1 = n - m$ и $v_2 = m - 1$ степенях свободы и уровне значимости α . Если $F_k > F_{\text{табл}}$, то k -я переменная мультиколлинеарна с другими.

$$v_1 = 8 - 2 = 7; v_2 = 2 - 1 = 1. F_{\text{табл}}(7; 1) = 19,4$$

$$F_1 = (64,235 - 1) \frac{8 - 2}{2 - 1} = 221,32$$

Поскольку $F_1 > F_{\text{табл}}$, то переменная y мультиколлинеарна с другими.

$$F_2 = (6,387 - 1) \frac{8 - 2}{2 - 1} = 18,85$$

Поскольку $F_2 \leq F_{\text{табл}}$, то переменная x_1 не мультиколлинеарна с другими.

$$F_3 = (58,849 - 1) \frac{8 - 2}{2 - 1} = 202,47$$

Поскольку $F_3 > F_{\text{табл}}$, то переменная x_2 мультиколлинеарна с другими.

Произведем исследование абсолютных и относительных ошибок аппроксимации. Для несмещенной оценки дисперсии: $\varepsilon = Y - Y(x) = Y - X \cdot s$

Таблица 22. Расчетная таблица

Y	Y(x)	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - Y_{\text{ср}})^2$	$ \varepsilon : Y $
21.125	19.25	1.875	3.516	317.285	0.0888
22.875	23.063	-0.188	0.0352	258.004	0.0082
26.75	26.875	-0.125	0.0156	148.535	0.00467
29.125	30.688	-1.563	2.441	96.285	0.0536
46.75	47.188	-0.438	0.191	61.035	0.00936
47.625	51	-3.375	11.391	75.473	0.0709
57.75	54.813	2.937	8.629	353.91	0.0509
59.5	58.625	0.875	0.766	422.816	0.0147
			26.984	1733.344	0.301

Средняя ошибка аппроксимации

$$A = \frac{\sum |\varepsilon/Y|}{n} * 100\% \quad (40)$$

$$A = \frac{0,301}{8} * 100\% = 3,76\%$$

Оценка дисперсии:

$$s_e^2 = (Y - Y(X))^T (Y - Y(X)) \quad (41)$$

$$s_e^2 = 26,984$$

Несмещенная оценка дисперсии равна:

$$s^2 = \frac{1}{n - m - 1} * s_e^2 \quad (42)$$

$$s^2 = \frac{1}{8 - 2 - 1} * 26,984 = 5,3969$$

Оценка среднеквадратичного отклонения (стандартная ошибка для оценки Y):

$$S = \sqrt{S^2} \quad (43)$$

$$S = \sqrt{5,3969} = 2,323$$

Оценка ковариационной матрицы вектора $k = S^2 \cdot (X^T X)^{-1}$

$$k(x)=5,4 \begin{vmatrix} 68,275 & -0,045 & -5,75 \\ -0,045 & 0,001 & 0 \\ -5,75 & 0 & 0,5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 368,472 & -0,243 & -31,032 \\ -0,243 & 0,0054 & 0 \\ -31,032 & 0 & 2,698 \end{vmatrix}$$

Дисперсии параметров модели определяются соотношением $S^2_{i} = K_{ii}$, т.е. это элементы, лежащие на главной диагонали

$$S_{b0} = \sqrt{368,472} = 19,196$$

$$S_{b1} = \sqrt{0,0054} = 0,0735$$

$$S_{b2} = \sqrt{2,698} = 1,643$$

Определим частные коэффициенты эластичности по формуле:

$$E_i = b_i * \frac{\bar{x}_i}{y} \quad (44)$$

$$E_1 = 0,381 * \frac{45}{38,94} = 0,441$$

Частный коэффициент эластичности $|E_1| < 1$. Следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно.

$$E_2 = 27,938 * \frac{11,5}{38,94} = 8,251$$

Частные коэффициент эластичности $|E_2| > 1$. Следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y .

Находим множественный коэффициент корреляции по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{s_e^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (45)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{26,984}{1733,34}} = 0,9922$$

Находим скорректированный коэффициент детерминации по формуле:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) * \frac{n - 1}{n - m - 1} \quad (46)$$

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - 0,9844) * \frac{8 - 1}{8 - 8 - 1} = 0,978$$

Произведем оценку значения результативного признака при заданных значениях факторов.

$$Y(0,0) = -299.5 + 0.381 \cdot 0 + 27.938 \cdot 0 = -299.5$$

$$V = X_0^T (X^T X)^{-1} X_0 \quad (47)$$

Где

$$X_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$X_0^T = [1 \ ; \ 0 \ ; \ 0]$$

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 68,275 & -0,045 & -5,75 \\ -0,045 & 0,001 & 0 \\ -5,75 & 0 & 0,5 \end{pmatrix}$$

Умножаем матрицы X_0^T и $(X^T X)^{-1}$

$$X_0^T \text{ и } (X^T X)^{-1} = (1; 0; 0) * \begin{vmatrix} 68,275 & -0,045 & -5,75 \\ -0,045 & 0,001 & 0 \\ -5,75 & 0 & 0,5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 68,275 - 0,045 - 5,75 \end{vmatrix}$$

Умножаем полученную матрицу на X_0 , находим $V = 68.28$

$$S_y = S\sqrt{V} \quad (48)$$

$$S_y = 2,32\sqrt{68,28} = 19,2$$

Доверительные интервалы с вероятностью 0.95 для значения результативного признака $M(Y)$.

$$(Y - t * S_y; Y + t * S_y) \quad (49)$$

где $t(8-2-1; 0.05/2) = 2.571$ находим по таблице Стьюдента.

$$(-299.5 - 2.571 \cdot 19.2; -299.5 + 2.571 \cdot 19.2)$$

$$(-348.86; -250.14)$$

С вероятностью 0.95 среднее значение Y при X_{0i} находится в указанных пределах.

Доверительные интервалы с вероятностью 0.95 для индивидуального значения результативного признака.

$$S_y = S\sqrt{1 + V} \quad (50)$$

$$S_y = 2.32\sqrt{1 + 68.28} = 19,34$$

$$(-299.5 - 2.571 \cdot 19.34; -299.5 + 2.571 \cdot 19.34)$$

$$(-349.22; -249.78)$$

С вероятностью 0.95 индивидуальное значение Y при X_{0i} находится в указанных пределах.

Произведем проверка гипотез относительно коэффициентов уравнения регрессии

$$T_{\text{табл}}(n-m-1; \alpha/2) = (5; 0.025) = 2.571$$

$$t_i = \frac{b_i}{S_{b_i}} \quad (51)$$

$$t_0 = \frac{-299,5}{19,196} = 15,603 > 2,571$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_0 подтверждается.

$$t_1 = \frac{0,381}{0,0735} = 5,19 > 2,571$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_1 подтверждается.

$$t_2 = \frac{27,938}{1,643} = 17,007 > 2,571$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_2 подтверждается.

Определим доверительные интервалы коэффициентов регрессии, которые с надежностью 95% будут следующими:

$$b_i - t_i * S_{b_i}; b_i + t_i * S_{b_i} \quad (52)$$

$$b_0: (-299,5 - 2,571 * 19,196; -299,5 + 2,571 * 19,196) = (-348,852; -250,148)$$

$$b_1: (0,381 - 2,571 * 0,0735; 0,381 + 2,571 * 0,0735) = (0,192; 0,57)$$

$$b_2: (27,938 - 2,571 * 1,643; 27,938 + 2,571 * 1,643) = (23,714; 32,161)$$

Проверим гипотезу об общей значимости всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0 : R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0 \quad (53)$$

$$H_1 : R^2 \neq 0 \quad (54)$$

Если $F < F_{кр} = F_{\alpha; n-m-1}$, то нет оснований для отклонения гипотезы H_0 .

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} * \frac{n-m-1}{m} \quad (55)$$

$$F = \frac{0,9844}{1-0,9844} * \frac{8-2-1}{2} = 158,088$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 2$ и $k_2 = n-m-1 = 8 - 2 - 1 = 5$, $F_{кр}(2;5) = 5.79$

Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно.

Произведем проверочный анализ в модуле множественная регрессия пакета “Статистика”, для этого создаем таблицу данных с числом переменных 3 и с числом регистров 9. Где в наименовании переменных:

1. Lightintensive - среднее значение интенсивности отражения (Люкс)
2. Solutiontemperature - температура раствора
3. Hydrogenindicator - водородный показатель (PH)

	1 light intensiv	2 Solution temperature	3 Hydrogen indicator(PH)
1	19,875		
2	21,125		11
3	22,875		11
4	26,75		11
5	29,125		11
6	46,75		12
7	47,625		12
8	57,75		12
9	59,5		12

Рисунок 25. Создание таблицы данных в программном пакете
“Статистика”

Корреляционная матрица, стандартизированные коэффициенты бета и регрессионные результаты, представленные на рисунке, полностью соответствуют выполненным расчетам.

Correlations (analiz)			
Variable	Solution temperature	Hydrogen indicator(PH)	light intensiv
Solution temperature	1,000000	0,000000	0,289579
Hydrogen indicator(PH)	0,000000	1,000000	0,948987
light intensiv	0,289579	0,948987	1,000000

Summary Statistics, DV: light intensiv (analiz)	
Statistic	Value
Multiple R	0,99218556
Multiple Rl	0,984432185
Adjusted Rl	0,978205059
F(2,5)	158,087724
p	0,0000302391218
Std.Err. of Estimate	2,32311752

Regression Summary for Dependent Variable: light intensiv (analiz)						
R= ,99218556 Rl= ,98443218 Adjusted Rl= ,97820506						
F(2,5)=158,09 p<,00003 Std Error of estimate: 2,3231						
N=8	b*	Std. Err. of b*	b	Std. Err. of b	t(5)	p-value
Intercept			-299,500	19,19562	-15,6025	0,000020
Solution temperature	0,289579	0,055799	0,381	0,07346	5,1897	0,003497
Hydrogen indicator(PH)	0,948987	0,055799	27,938	1,64269	17,0071	0,000013

Predicting Values for (analiz) variable: light intensiv			
Variable	b-Weight	Value	b-Weight * Value
Solution temperature	0,38125	55,00000	20,969
Hydrogen indicator(PH)	27,93750	11,00000	307,313
Intercept			-299,500
Predicted			28,781
-95,0%CL			25,248
+95,0%CL			32,314

Рисунок 26. Анализ множественной регрессии в программном пакете
“Статистика”

Отсутствие парных значений с коэффициентом более 0.7 характеризует отсутствие мультиколлинеарности. Полученное р - значение указывает на хорошую оценку приемлемости модели в целом. Коэффициент детерминация указывает на работоспособность модели в 98 процентов.

На этапе проверки построения прогноза предсказанный результат 28,781 что является достаточно приближенным к фактическому 32 и можем судить что разница составила чуть больше 3,5 процентов.

В результате анализа был построен трехмерный график характеризующий регрессионные зависимости и получено уравнение соответствующее расчетному.

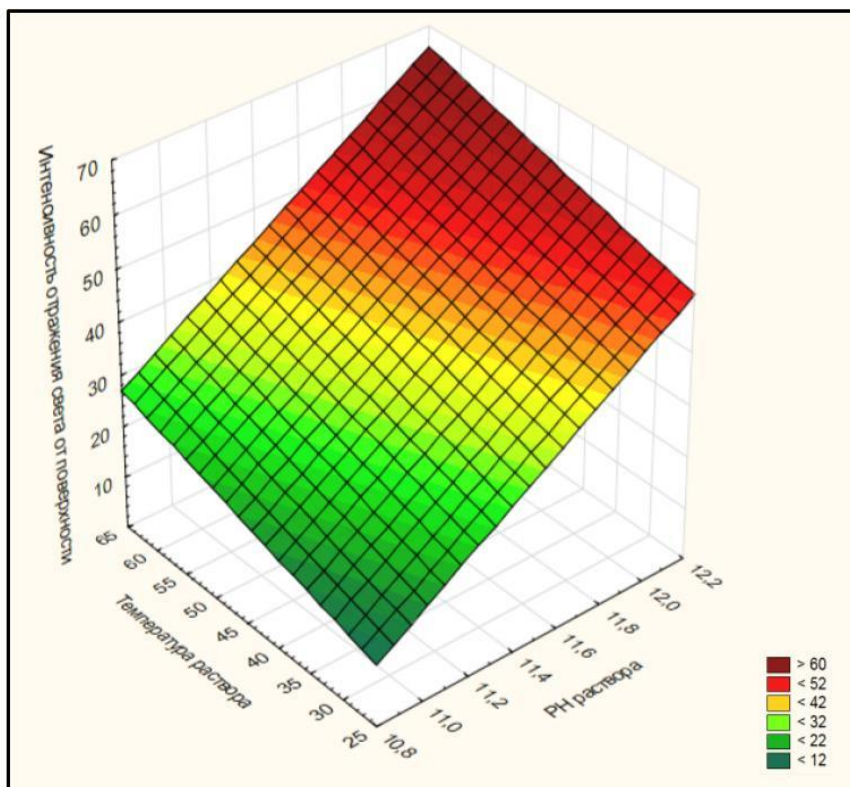


Рисунок 27. График характеризующий зависимость значения между интенсивностью отраженного светового потока от поверхности образца, температурой и РН раствора

4.5 Выводы к четвертой главе

В результате получено уравнение множественной регрессии, которое имеет вид: $Y = -299.5 + 0.3813X_1 + 27.9375X_2$.

Параметры модели интерпретируются следующим:

- увеличение температуры раствора на 1 градус Цельсия приводит к увеличению значения интенсивности отражения от поверхности в среднем на 0.381 Люкс;

- увеличение водородного показателя РН раствора на 1 приводит к увеличению значения интенсивности отражения от поверхности в среднем на

27.938 Люкс. По максимальному коэффициенту $\beta_2=0.949$ делаем вывод, что наибольшее влияние на результат интенсивности отражения оказывает фактор водородный показатель pH раствора. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера.

Установлено, что в исследуемой ситуации 98.44% общей вариабельности интенсивности отражения объясняется изменением факторов.

Установлено также, что параметры модели статистически значимы.

5. Исследование влияния степени загрязненности поверхности на теплоэффективность оребренной биметаллической трубы АВО

Для исследования влияния степени загрязненности поверхности на теплоэффективности оребренной биметаллической трубы АВО, разработан испытательный стенд экспресс анализа теплоэффективности оребренных труб, технологическая схема которого представлена на рисунке.

5.1 Разработка испытательного стенда экспресс анализа теплоэффективности оребренных труб

Испытательный стенд содержит: расширитель, шаровой кран, отстойник с трубчатым нагревателем, циркуляционный насос, вентиль, датчик расхода, датчики температуры, загружаемый образец оребренной трубы, диффузор, вентилятор.

Экспериментальный стенд работает следующим образом. Рабочая среда поступает через расширитель 1 и шаровой кран 2 в отстойник 3, из отстойника рабочая среда полностью заполняет систему. Движение воды создается циркуляционным насосом 4, расход контролируется датчиком расхода 6. Давление на входе в теплообменную секцию стенда контролируется вентилем 5. Подогрев рабочей среды до необходимой температуры осуществляется трубчатым электрическим нагревателем внутри емкости 3. Температура жидкости на входе и выходе в оребренную трубу замеряется датчиками температуры 7. Воздух и водяной пар (при наличии) высвобождается из отстойника через расширитель. На позиции 10 обозначен вентилятор, работающий в режиме втягивания воздуха через диффузор 9. Обратное направление воздуха не рекомендуется в связи с нарушением ламинарности потока воздуха. Все показатели измерительных датчиков автоматизировано записываются в таблицу при помощи микроконтроллера.

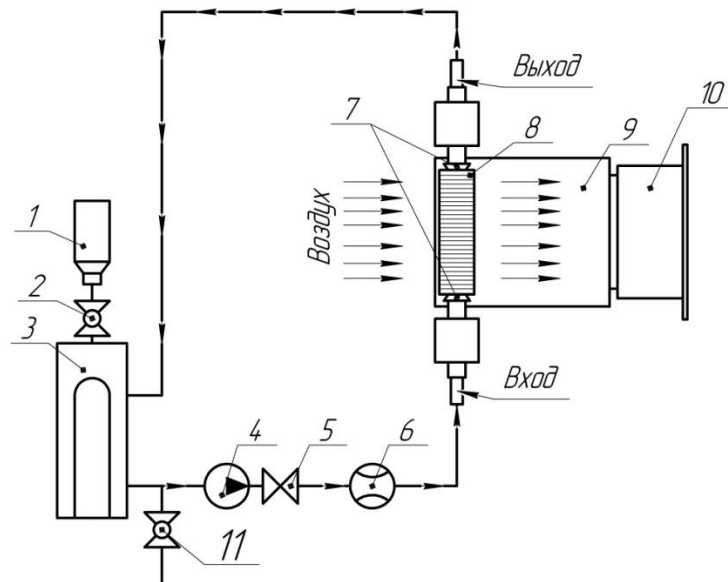


Рисунок 27. Технологическая схема испытательного стенда экспресс анализа теплоэффективности ребренных труб

Измерение температуры воздушного потока осуществляется с помощью датчиков температуры схема расположения, которых представлена на рисунке 28.

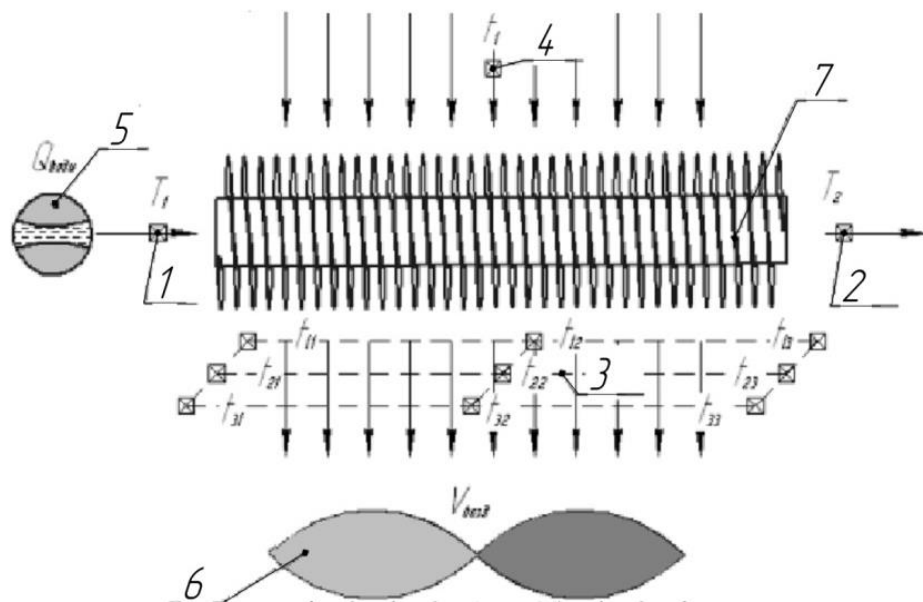


Рисунок 28. Схема расположения измерительных датчиков на тепловом лабораторном стенде

5.2 Методика проведения испытаний

В результате исследований влияния степени загрязненности оребренной трубы на интенсивность рассеивания лучистой энергии от поверхности были получены образцы с различными степенями загрязнения. Степень загрязненности образца характеризуется интенсивностью, отраженной от поверхности лучистой энергии в единицах Люкс.

Установлено что значение интенсивность отражения увеличивается при снижении степени загрязненности очищенной поверхности образца.

Из девяти исследуемых образцов оребренной трубы для исследования влияния степени загрязненности поверхности на теплоэффективность были выбраны наиболее вариативные по значению интенсивности отражения световой энергии от поверхности. Образцам присвоены порядковые номера от 1 до 4 в зависимости от загрязнения, где 4 наименее загрязненная поверхность. Каждому номеру соответствует интенсивность отражения, полученная в результате измерения. Образец с порядковым номером 1 не подвергался процессу очистки. В таблице представлены значения соответствующим порядковым номерам образцов.

Таблица 23. Полученные экспериментальные данные

№ образца	Интенсивность отраженной лучистой энергии от поверхности образца
1	21,1
2	29,1
3	46,7
4	59,5

В ходе исследований образец помещается в аэродинамическую секцию сечением 310x88 мм, где воздушный поток расходом от 0,024552 до 0,210329 м³/сек, создаётся щелевым центробежным вентилятором. Вентилятор работает на всас, что позволяет гарантировать ламинарный поток.

Внутри трубы течёт охлаждаемая вода. Расход от 0,04 до 0,13 л/сек. обеспечивается циркуляционным насосом UPS 25/60. Температура воды регулируется трубчатым электрическим нагревателем 800 Вт, который установлен в цилиндрическом отстойнике с расширительным бачком для подпитки системы циркуляции. Диапазон изменения температуры воды диктуется максимальным тепловым потоком (около 730 Вт), который на практике не превышает 100 °С при максимальном расходе воды и воздуха с гладкой трубой диаметром 16 мм и толщиной стенки 1 мм. Вода циркулирует по схеме, представленной на рисунке



Рисунок 29. Схема циркуляции воды

При замене трубы, циркулирующая вода сливается через систему кранов в дренажную линию. Система кранов позволяет разбить схему циркуляции на линейные участки, что необходимо для стравливания воздуха при заполнении схемы водой. Давление в схеме близко к атмосферному и не учитывается.

Температура воды измеряется непосредственно на входе и выходе из трубы. Температура воздуха измеряется одним датчиком на входе и девятью на выходе, непосредственно после трубы, что позволяет иметь полную картину о распределении температур воздушных потоков после трубы. Измерения температур производятся датчиками DALLAS DS18B20 абсолютной погрешностью $\pm 0,5$ °С, в диапазоне измеряемых температур на стенде. Расход воды измеряется расходомером Вэлэт ЭР 430Л условным диаметром 20 мм относительной погрешностью $\pm 2\%$. Расход воздуха замерялся портативным анемометром WindMaster 2 с относительной погрешностью $\pm 4\%$ исходя из свободного от трубы сечения аэродинамической секции. Замер производился в шести характерных точках сечения.

Таблица 24. Перечень контрольно-измерительных приборов, применяемых при испытаниях

№	Наименование параметра	Тип прибора	Пределы измерений	Количество точек измерения	Абсолютная погрешность
1	2	3	4	5	6
1	Температура воды на входе в трубу T_1 , °С	Цифровой датчик температуры DS1820	от -55 до 125	1	$\pm 0,5$
2	Температура воды на выходе из трубы T_2 , °С			1	
3	Температура воздуха на входе в аэродинамическую секцию, t_1 , °С			1	
4	Температура воздуха на выходе из аэродинамической секции t_2 , °С			9	

Продолжение таблицы 24.

1	2	3	4	5	6
5	Расход воды $V_{\text{воды}}$, л/сек	Расходомер электромагнитный УF- S201	от 0,0008 до 0,1885	1	
6	Расход воздуха $W_{\text{возд}}$, м/сек	Термоанемометр ТММ- 2-04	от 0,7 до 42	1	$\pm 0,00001$ 5

Сбор и обработка данных с датчиков температуры производился посредством микроконтроллера Arduino по однопроводной линии связи, используя протокол 1-Wire. Прием данных с микроконтроллера посредством порта реализуется через интерфейс Arduino IDE. Полученные в порт значения каждую секунду эксперимента автоматизировано заполняются в таблицу при помощи программной утилиты с открытым исходным кодом PLX-DAQ.

Проведение эксперимента представляет собой следующие виды работ:

- 1) визуальный осмотр оборудования;
- 2) проверка надежности соединений, крепежей и опор;
- 3) проверка электрических кабелей и питания электросети;
- 4) проверка работоспособности контрольно-измерительных приборов и промышленных микроконтроллеров;
- 5) диагностика технологического оборудования и пусковыработки;
- 6) загрузка в систему технической воды определенного объема;
- 7) проверка на герметичность и устранение протечек;
- 8) включение приборов и электрооборудования;
- 9) запуск насоса;
- 10) включение трубчатого электронагревателя;

- 11) прогрев рабочей среды до заданной температуры;
- 12) включение вентилятора определенным количеством оборотов в минуту для поддержания заданного расхода воздуха;
- 13) регистрация показателей контрольно-измерительных приборов в момент запуска вентилятора;
- 14) регистрация показателей датчиков;
- 15) выключение трубчатого электронагревателя;
- 16) охлаждение рабочей среды до оптимальной температуры;
- 17) выключение вентилятора;
- 18) выключение насоса;

В результате эксперимента была сформирована выборка из генеральной совокупности полученных данных. Каждый образец подвергался двум циклам запуска, в процессе которых проводилось измерение параметров эксперимента. Принципиальная схема цикла эксперимента представлена на рисунке 30.



Рисунок 30. Принципиальная схема эксперимента

Полученные значения в ходе работы в режиме реального времени фиксировались в таблицу базы данных, где значения с датчиков Т4-Т12 усреднялись и записывались как температура воздуха на выходе из диффузора - $T_2^{возд}$, значение с датчика Т3 записывалось как температура

воздуха на входе в диффузор - $T_1^{\text{возд}}$, значение с датчика T1 и T2 как температура воды на входе и на выходе из трубы - $T_1^{\text{воды}}$, $T_2^{\text{воды}}$.

Схема расположения датчиков температуры представлена на рисунке.

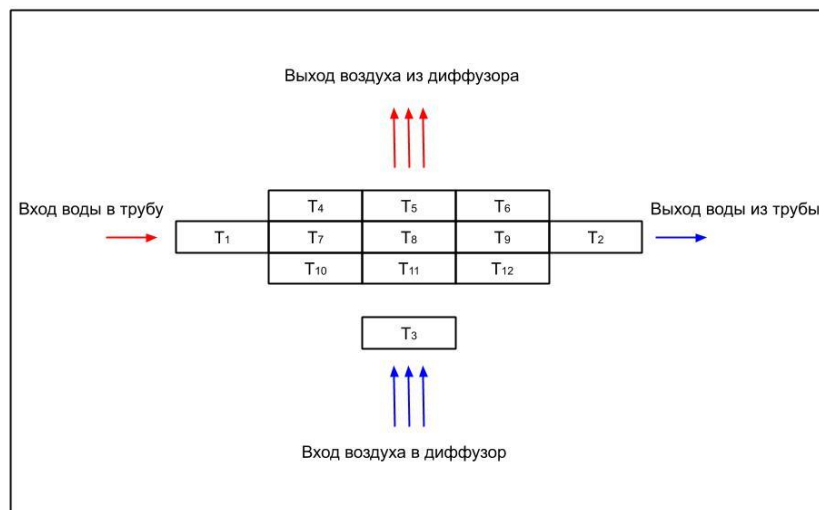


Рисунок 31.Схема расположения датчиков температуры

В таблице 25 представлена выборка данных, где у каждого образца оребренной трубы десять измерений при температуре воды на входе в трубу равной 65-66°C.

Таблица 25. Выборка экспериментальных данных

№ образца	$T_1^{\text{возд}}$	$T_2^{\text{возд}}$	$T_{\text{ср.возд}}$	$T_1^{\text{воды}}$	$T_2^{\text{воды}}$	$T_{\text{ср.воды}}$	$V_{\text{возд}}$	$V_{\text{воды}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	19,69	19,73	19,71	65,12	55,88	60,50	0,32	0,000016
	19,69	19,67	19,68	65,37	56,00	60,68	0,32	0,000016
	19,69	19,66	19,67	65,56	56,19	60,87	0,32	0,000016
	19,69	19,74	19,71	65,69	56,38	61,03	0,32	0,000016
	19,00	19,17	19,08	65,06	55,38	60,22	0,32	0,000016
	19,00	19,15	19,07	65,25	55,56	60,40	0,32	0,000016
	19,00	19,09	19,04	65,44	55,69	60,56	0,32	0,000016
	19,06	19,09	19,06	65,62	55,81	60,71	0,32	0,000016
	19,06	19,03	19,04	65,81	55,94	60,87	0,32	0,000016
	19,69	19,62	19,65	64,94	55,81	60,37	0,32	0,000016

Продолжение таблицы 25.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	20,19	23,70	21,94	65,00	54,88	59,94	0,32	0,000016
	20,25	23,60	21,92	65,12	54,88	60,00	0,32	0,000016
	20,31	23,75	22,03	65,5	55,81	60,65	0,32	0,000016
	20,31	23,88	22,09	65,56	55,88	60,72	0,32	0,000016
	20,31	23,83	22,07	65,50	55,94	60,72	0,32	0,000016
	20,37	23,68	22,02	65,75	55,75	60,75	0,32	0,000016
	20,5	24,01	22,25	65,87	56,00	60,93	0,32	0,000016
	20,25	23,75	22,00	65,87	55,81	60,46	0,32	0,000016
	20,19	23,86	22,02	65,00	55,81	60,40	0,32	0,000016
	20,19	23,84	22,01	65,69	56,38	61,03	0,32	0,000016
3	20,94	23,49	22,21	65,06	53,69	59,37	0,32	0,000016
	21,06	23,54	22,30	65,19	53,63	59,41	0,32	0,000016
	21,06	23,57	22,31	65,25	53,56	59,40	0,32	0,000016
	21,00	23,48	22,24	65,31	53,56	59,43	0,32	0,000016
	20,94	23,50	22,22	65,50	53,50	59,5	0,32	0,000016
	20,94	23,79	22,36	65,37	55,25	60,31	0,32	0,000016
	20,94	23,74	22,34	65,37	55,44	60,40	0,32	0,000016
	21,00	23,85	22,42	65,44	55,63	60,53	0,32	0,000016
	21,00	23,90	22,45	65,50	55,56	60,53	0,32	0,000016
	20,94	23,73	22,33	65,81	55,94	60,87	0,32	0,000016
4	20,69	22,96	21,82	65,06	52,19	58,62	0,32	0,000016
	20,62	23,13	21,87	65,00	52,88	58,94	0,32	0,000016
	20,62	23,20	21,91	65,00	53,00	59,00	0,32	0,000016
	20,56	23,13	21,84	65,00	53,13	59,06	0,32	0,000016
	20,56	23,13	21,84	65,06	53,19	59,12	0,32	0,000016
	20,56	23,25	23,25	65,19	53,88	59,53	0,32	0,000016
	20,56	23,27	23,27	65,31	54,13	59,72	0,32	0,000016
	20,56	23,19	23,19	65,37	54,06	59,71	0,32	0,000016
	20,69	23,22	23,22	65,56	54,00	59,78	0,32	0,000016
	20,69	23,11	23,11	65,87	54,19	60,03	0,32	0,000016

5.3 Методика обработки экспериментальных данных.

Расчет параметров испытания выполняется по следующим формулам:

Объемный расход охлаждающего воздуха в диффузоре:

$$V_{\text{возд}} = W_{\text{дифф}}^{\text{возд}} * S_{\text{дифф}}, \frac{\text{М}^3}{\text{сек}}; \quad (56)$$

где $W_{\text{дифф}}^{\text{возд}}$ - скорость воздуха в диффузоре измеряемая анемометром, м/с;

$S_{\text{дифф}}$ - площадь диффузора, м²

Площадь диффузора рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{\text{дифф}} = a_{\text{дифф}} * b_{\text{дифф}}, \text{М}^2; \quad (57)$$

где $a_{\text{дифф}}$, $b_{\text{дифф}}$ - длинна и ширина диффузора

Средняя температура воздуха на выходе из диффузора рассчитывается по следующей формуле:

$$T_2^{\text{ср.возд}} = \frac{\sum_{n=1}^9 T_1^n}{9}, \text{°С}; \quad (58)$$

где $T_1^1 - T_2^9$ - температуры с 9-ти температурных датчиков в диффузоре

Плотность воздуха - $\rho_{\text{возд}}$ была взята из справочника по среднему значению температурных режимов стенда [справочник].

Массовый расход воздуха рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{\text{М}}^{\text{возд}} = \rho_{\text{возд}} * V_{\text{возд}}, \text{кг/сек}; \quad (59)$$

где $\rho_{\text{возд}}$ - плотность воздуха, кг/м³;

$V_{\text{возд}}$ - объемный расход охлаждающего воздуха в диффузоре, м³/сек;

Конструктивные размеры оребренной трубы были взяты из таблицы [1]:

Таблица 26. Геометрические параметры оребренных труб АВО

d, мм	D, мм	H, мм	b, мм	t, мм	Коэффициент оребрения	Поверхность теплообмена на 1 п.м. оребренной трубы, м ²
1	2	3	4	5	6	7
16	36+1,0	10+0,5	0,6+0,1	2,5	12,5	0,699
	42+0,5/-1,5	12± 0,5	0,40+0,2	3	14	0,788
19	40+1,5/-0,5	10± 0,5	0,41+0,1	2,5	12	0,794
	50+1,5/-0,5	14+0,5	0,4± 0,2	3	16,5	1,069
20	43+1,0	10± 0,5	0,4+0,1	2,5	13	0,915
22	54+1,5/-0,5	15± 0,5	0,4+0,2	2,5	21,5	1,553
	52+1,5/-0,5	14+0,5	0,4+0,2	3	18	1,239
	40+1,5/-0,5	10± 0,5	0,4+0,2	3,5	15	1,110
25	57+0,5/-1,5	15± 0,4	0,3+0,1	2,5	20	1,628
	56+1,5/-0,5	14,5+0,5	0,4+0,2	3	14,6	1,284
	49+1,5/-0,5	10,5± 0,5	0,6+0,1	3,5	9	0,792
38	62+1,5/-0,5	10± 1,5	0,6+0,1	3,5	8	1,029
	70+0,5/-1,5	15± 0,4	0,6± 0,1	2,5	17,5	2,100

Разность температур воздуха рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta t^{\text{возд}} = T_1^{\text{ср.возд}} - T_2^{\text{ср.возд}} \quad (60)$$

Удельная теплоемкость, плотность воздуха были взяты из справочника по теплофизическим свойствам газов и жидкостей в соответствии с температурными режимами испытательного стенда

Средняя температура воды рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{\text{ср.воды}} = \frac{(T_1^{\text{ср.воды}} - T_2^{\text{ср.воды}})}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (61)$$

где $T_1^{\text{ср.воды}}$ - средняя температуры воды на входе, $^\circ\text{C}$;

$T_2^{\text{ср.воды}}$ - средняя температуры воды на выходе, $^\circ\text{C}$.

Разность температур воды

$$\Delta t^{\text{воды}} = T_1^{\text{ср.воды}} - T_2^{\text{ср.воды}} \quad (62)$$

Плотность воздуха - $\rho_{\text{воды}}$ была взята из справочника по среднему значению температурных режимов стенда [справочник].

Тепловая мощность рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = K * \theta * F, \text{ Вт}; \quad (63)$$

где K - коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

где θ - средняя разность температур теплоносителей, называемая температурным напором и зависящая от их начальных и конечных температур и схемы теплообмена (прямоточной, противоточной, перекрестной, смешанной и др.).

F - площадь поверхности теплопередачи, м^2

Суммарная теплопередача от воды к воздуху рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \frac{Q}{\theta * F}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}; \quad (64)$$

Средний логарифмический температурный напор рассчитывается по формуле:

$$z_t = \sqrt{(A + 1)^2 - 4p_s A} \quad (65)$$

При выполнении тепловых расчетов используют следующие функции полных теплоемкостей массовых расходов:

$$A = \frac{W_{\min}}{W_{\max}} = \frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max}} \quad (66)$$

$$R = \frac{W_{\max}}{W_{\min}} = \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}} \quad (67)$$

$$A = \frac{W_2}{W_1} = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')} \quad (68)$$

А также безразмерные комплексы A , R и P , которые также являются функциями начальных и конечных температур сред:

$$A = \frac{W_1}{W_2} = \frac{T_2^{\text{ср.возд}} - T_1^{\text{ср.возд}}}{T_1^{\text{ср.воды}} - T_2^{\text{ср.воды}}} \quad (69)$$

$$R = \frac{W_2}{W_1} = \frac{T_1^{\text{ср.воды}} - T_2^{\text{ср.воды}}}{T_2^{\text{ср.возд}} - T_1^{\text{ср.возд}}} \quad (70)$$

$$P = \frac{T_2^{\text{ср.возд}} - T_1^{\text{ср.возд}}}{T_1^{\text{ср.воды}} - T_1^{\text{ср.возд}}} \quad (71)$$

Средний температурный поток рассчитывается по формуле:

$$\theta = \frac{z_t (T_1^{\text{ср.воды}} - T_1^{\text{ср.возд}}) PR}{\ln \frac{2 - PR[(A + 1) - z_t]}{2 - PR[(A + 1) + z_t]}} \cdot ^\circ\text{C}; \quad (72)$$

Таблица 27. Обозначение основных переменных

Название переменной	Обозначение	Размерность
Объемный расход охлаждающего воздуха в диффузоре	$V_{\text{возд}}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{сек}}$
Площадь диффузора	$S_{\text{дифф}}$	м^2
Средняя температура воздуха на выходе из диффузора	$T_2^{\text{ср.возд}}$	$^{\circ}\text{C}$
Массовый расход воздуха:	$Q_{\text{м}}^{\text{возд}}$	$\text{кг/сек};$
Разность температур воздуха	$\Delta t^{\text{возд}}$	$^{\circ}\text{C}$
Средняя температура воды	$T^{\text{ср.воды}}$	$^{\circ}\text{C}$
Разность температур воды	$\Delta t^{\text{воды}}$	$^{\circ}\text{C}$
Тепловая мощность	Q	Вт
Суммарная теплопередача от воды к воздуху	K	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$
Средне логарифмический температурный напор	z_t	$^{\circ}\text{C}$
Средний температурный поток	θ	$^{\circ}\text{C}$

Выполнив расчеты, используя данную методику для каждого образца получили суммарную теплопередачу от воды к воздуху. Полученные данные представлены в таблице 28.

Таблица 28. Расчетные данные эксперимента

№ образца	Суммарная теплопередача от воды к воздуху	Размерность
1	67,54	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$
2	73,48	
3	84,00	
4	92,00	

Был построен график зависимости значений суммарной теплопередачи от воды к воздуху к интенсивности отраженной лучистой энергии от поверхности.

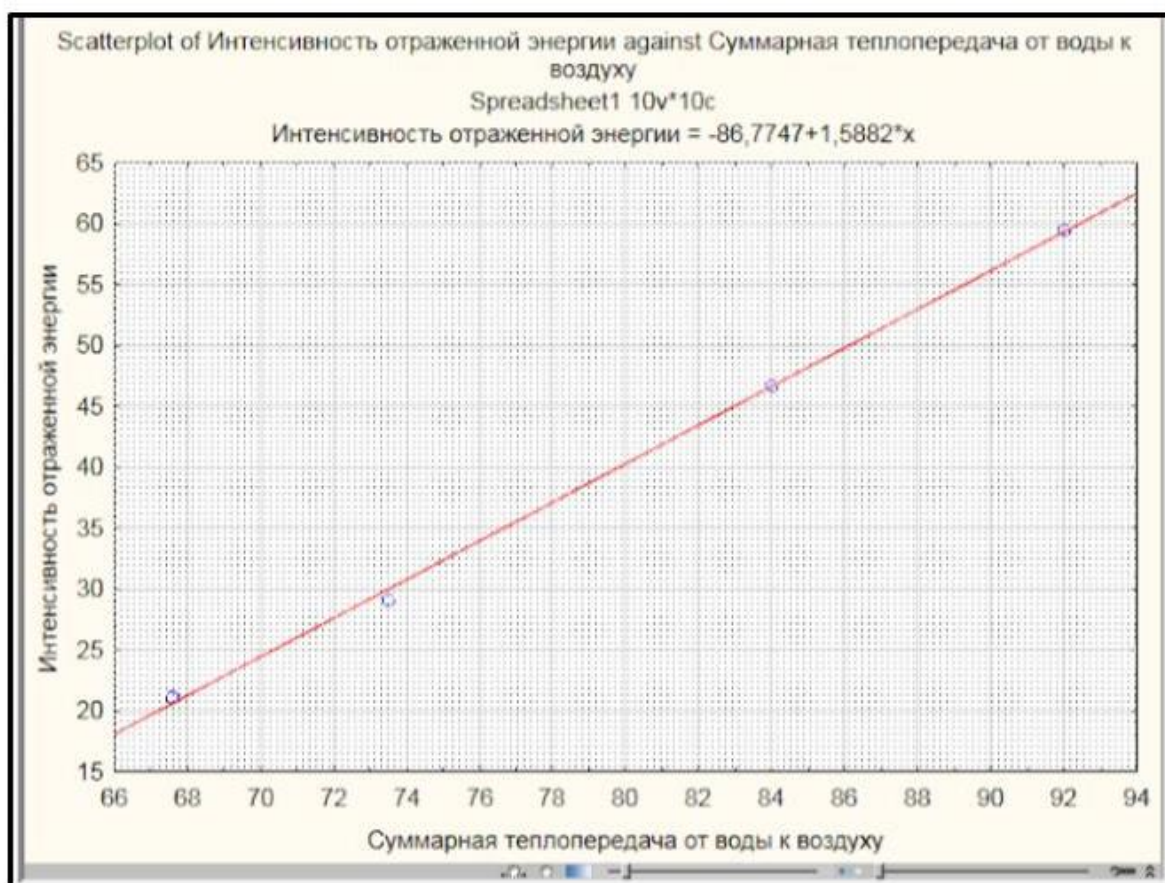


Рисунок 32. График зависимости значений суммарной теплопередачи от воды к воздуху к интенсивности отраженной лучистой энергии от поверхности

5.4 Выводы к пятой главе

Для определения теплового баланса использовался температурный градиент основного контролируемого теплоносителя. Так как воздух имеет меньшую теплоёмкость вероятность получить расхождения в данных больше, в следствии в качестве основного теплоносителя была выбрана вода. Температурные датчики фиксировали значения с большой инертностью. В данном случае инертность датчиков не влияло на эксперимент, так как не

происходило быстрого изменения в режиме. Для определения точного теплового баланса требовалось иметь большую разность температур по выбранному теплоносителю. При увеличении скорости воздуха, устанавливается фиксируемая разница температуры на входе и выходе воды, но также снижается разность температур по воздуху.

Так как для определения температурного градиента требуются температурные параметры по обоим теплоносителям, тепловой баланс по воздуху был использован только для расчётов.

Тепловой баланс по воздуху не сходил с тепловым балансом по воде, по причине того что температура воздуха на входе измерялась в устоявшемся воздушном потоке, где скорость воздуха почти равна нулю, а температура воздуха на выходе измерялась в диффузоре, где воздух имел большую турбулентность.

Суммарная теплопередача от воды к воздуху характеризует коэффициент теплопередачи и может быть использована при оценке тепловой эффективности экспериментальных образцов оребренной биметаллической трубы.

Сопоставляя значения суммарной теплопередачи и полученные ранее данные по интенсивности отражения лучистой энергии можем сделать вывод, что присутствует сильная прямая корреляция с коэффициентом корреляции равной $R = 0,92$ и с уровнем значимости $p < 0,05$.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оставленных задач были получены следующие результаты:

-Выполнен сравнительный анализ и патентная проработка существующей технологии и выявлены существенные недостатки применяемых устройств для очистки оребренных биметаллических труб АВО.

-Выполнен сравнительный анализ существующих методов оценки степени загрязненности поверхностей металлических деталей и поставлены задачи для разработки техники и технологии экспресс оценки загрязненности поверхности оребренной трубы.

-Разработаны технология автоматизированной очистки оребренной трубы в технологическом потоке изготовления

-Изготовлено и апробировано устройство очистки оребренной трубы позволяющее оптимизировать процесс производства и исключить энергозатратные, трудоемкие операции в существующей технологии.

-Для получения образцов оребренных биметаллических труб с различной изготовлен экспериментальный стенд очистки образцов оребренных биметаллических труб.

Разработан и изготовлен экспериментальный стенд экспресс оценки степени загрязненности образцов оребренной трубы для измерения интенсивности отражения световых лучей от поверхности и получены экспериментальные данные.

-Произведен статистический анализ экспериментальных данных и построена регрессионная модель характеризующая зависимость режимов очистки на интенсивность отражения лучистой энергии от поверхности экспериментальных образцов.

-Разработан и изготовлен испытательный стенд экспресс анализа теплоэффективности оребренных труб, методика эксперимента

7 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Schulenberg F. Die bedeutung der luftkuhlung in kraftwerken und in der verfahrenstechnik // Brennst – Wärme – Kraft/ - 1998/ - Vol/ 40, no. 9. – Pp. 349 – 352.
2. Sparrow E., Niethammer J. Effect of vertical separation distance and cylinder- to – cylinder temperature imbalance on natural convection for a pair a horizon cylinders // Trans. ASME J. Heat Transfer – 1981. – Vol. 103, no. 5. – Pp. 638-644.
3. Абдеев Э. Р. Повышение тепловой эффективности оребренных труб на стадии изготовления. / Абдеев Э. Р., Шарипов М. И., Абдеев Р. Г. // V Всероссийская научно-методическая конференция (с международным участием) «Инновации и наукоемкие технологии в образовании и экономике», Уфа., 2009., С.304-307.
4. Абдеев Э. Р. Разработка стенда и методики оценки технологических характеристик оребренных труб АВО. / Абдеев Э. Р., Дозорцев А. В., Давыдов Д. С., и др. // Девятый международный научный симпозиум им. М. А. Усова студентов и молодых ученых, Томск 2005 г.
5. Абдеев Э.Р., Иванов А.С., Шавалеев Э.И. Система дистанционного управления для системы очистки оребренных труб. В сборнике: Современные технологии в нефтегазовом деле - 2017 сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х томах. 2017. С. 98-99.
6. Абдеев Э.Р., Лобанов М.А., Шавалеев Э.И., Рукомойников А.А., Швецов М.В. Повышение тепловой эффективности аппаратов воздушного охлаждения снижением загрязненности поверхности теплообменных труб в процессе эксплуатации. В сборнике: XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики Сборник трудов в 4-х томах. 2019. С. 941-943.

7. Абдеев Э.Р., Шавалеев Э.И. Совершенствование производства аппаратов воздушного охлаждения путем автоматизации процесса промывки оребренных труб в технологическом потоке. В сборнике: Современные технологии композиционных материалов. Материалы II научно-практической молодежной конференции с международным участием. Ответственный редактор У.Ш. Шаяхметов. 2016. С. 197-201.

8. Андрескуте Р.О., Шавалеев Э.И. Разработка технологии регенерации моющего раствора системы очистки оребренных труб. В сборнике: Актуальные вопросы машиностроения Материалы I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор Р.Г. Абдеев. 2018. С. 38-40.

9. Антуфьев В.М., Белецкий Г.С. Теплопередача и аэродинамические сопротивления трубчатых поверхностей в поперечном потоке.- М.: Машгиз, 1948.-117 с.

10. Бакиев А.В. Технология аппаратостроения. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001.-297 с.

11. Белова, Н. В. Применение полного факторного эксперимента при измерении параметров газового потока / Н. В. Белова, О. А. Малинина. — Текст: непосредственный, электронный // Молодой ученый. — 2010. — № 4 (15). — С. 65-70. — URL: <https://moluch.ru/archive/15/1418/> (дата обращения: 28.04.2020).

12. ГОСТ 9.402-2004.Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.

13. Дубровский Ю.С. СОЖ и ТС концерна P11CH5 (Германия) для процессов металлообработки/ Инженерия поверхности и реновация изделий // Матер. 3-й между нар. науч.техн.конф. Киев, АТМ. Украины, 2003. С. 63-64.

14. Зайнуллин И.Р., Шавалеев Э.И. Автоматизация процесса подготовки производства АВО. В сборнике: Актуальные вопросы машиностроения Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор Р.Г. Абдеев. 2019. С. 221-225.
15. Захаров Н.В., Ремнев А.И., Хворост В.А. Технология обработки труб при изготовлении теплообменных энергетических установок из оребренных алюминиевых труб// Сборник научн. статей по матер. 4-й междунар.-техн. конф. К.: ИСМО, Алушта, 1997. С. 78 - 83.
16. И.В. Левитина, Е.В. Жаровцева, А.И. Толпекин, ООО «НПП «Технобиор» Рациональные технологии очистки поверхности алюминия. Мир гальваники No 4 (8) 2008.
17. Кадырова А.Р., Абдеев Э.Р., Шавалеев Э.И. Техника и технология очистки оребренных труб. В сборнике: Современные технологии композиционных материалов. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. 2019. С. 146-147.
18. Калафати Д.Д., Попалов В.В., Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1986.-173 с.
19. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. Пер. с англ.- М.: Энергия, 1977.-464 с.
20. Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. Тепловой и аэродинамический расчёты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – СПб; Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.
21. Кунтыш В. Б., Пиир А. Э., Аксенов В. В. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление в последовательно установленных пучках оребренных труб. – 1994. – 188 с.
22. Кунтыш В. Б., Степин Н. Н. // Изв. вузов. Лес. ж. – 1997. - №3. – С. 120-128.

23. Лавров Д.А. Интенсификация конвертивного теплообмена: оценка энергетической эффективности процесса теплопередачи конвективных поверхностей; экспериментальное измерение теплоаэродинамических характеристик в шахматных пучках высокой эффективности» : дисс. техн. наук. М., 1999.-23 с.

24. Легкий В. М. Аэродинамическое сопротивление поперечноомываемых коридорных пучков оребренных труб / Легкий В. М., Письменный Е. И., Терех А. М. // Теплоэнергетика, 1994, № 5, С. 58-61.

25. Малиновский Г.Т. Масляные СОЖ для обработки металлов резанием / Г. Т. Малиновский / М.: Химия, 1988. 188 с.

26. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи.- М.:Энергия.-344 с.

27. Патент РФ №98120169, кл. В08В 3/02, опубл. 2000.09.27. Устройство и способ для мойки оребренных труб. Патент РФ №2377079/Абдеев Р.Г., Абдеев Р.М., Шарипов М.И., Шафиков Р.Р., Шафиков Р.Р., Габитов Г.К., Абдеев Э.Р.

28. Ремнев А.И., Ремнева Л.А., Рыжкова М.Н. Моделирование и оценка качества очистки оребренных труб- Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы VIII Международной научно-технической конференции: в 2 частях. Ответственный редактор: Е.И. Яцун. 2011. С 153-165.

29. Шавалеев Э.И., Абдеев Э.Р., Лобанов М.А. Разработка системы очистки оребренных труб. В сборнике: Создание и модернизация технологий, материалов и аппаратов для инновационного развития экономики. Материалы Всероссийской научной конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения первого ректора БашГУ Шайхуллы Чанбарисова. ответственный редактор Баннова А.В.. 2016. С. 186-187.

30. Шарипов М. И. Механизированная очистка оребренных труб в технологическом потоке производства. Шарипов М. И., Абдеев Э. Р., Сафиуллин И.Р. и др. // Материалы V Всероссийской научно-методической конференции «Инновации и наукоемкие технологии в образовании и экономике» г. Уфа 2009., С. 180-181. Пат. 2377079 Российская Федерация, МПК В 08 В 5/00. Устройство и способ для мойки оребренных труб / Абдеев Р. Г., Абдеев Р. М., Шарипов М. И., Шафиков Р. Р., Габитов Г. К., Абдеев Э. Р. (РФ) – 2008109533/12; завл. 12.03.2008;опубл. 10.10.2009. Бюл. №36.

31. Шарипов М. И. Повышении тепловой эффективности теплообменников воздушного охлаждения КСБУ рациональной компоновкой и очисткой труб. / Шарипов М. И., Абдеев Э. Р., Сафиуллин И. Р. И др. // Материалы IX-Российской научно-практической конференции. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – С. 433-436.

32. Шарипов М.И. Повышение эффективности работы теплообменника воздушного охлаждения компрессорных станций буровых установок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Уфа-2010.

33. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно-оребрённых труб. –Л.: Машиностроение, 1982.-189 с.