

## АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора (PhD)  
по специальности 6D071700 – Теплоэнергетика

АБДРЕШОВА САМАЛ БЕКСУЛТАНОВНА

Разработка способов и устройств озонной технологии  
для очистки сточных вод ТЭС и котельных

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

Теплоэнергетика – отрасль, вносящая существенный вклад в загрязнение природной среды. Степень вреда сточных вод тепловых электростанций для окружающей среды зависит от многих факторов, главный из которых – химический состав сбрасываемых сточных вод. Наиболее опасными для природных водоемов считаются сбросы, содержащие масло- и нефтепродукты, а также тяжелые металлы.

Источники стоков воды в тепловой энергетике с различными объемами и с разными требованиями к степени очистки обуславливают необходимость применения различной техники и технологии воздействия на обрабатываемую воду и обуславливают актуальность тематики исследования. Как правило, вода, очищенная по существующей технологии не пригодна для санитарно-гигиенических и питьевых потребности. В связи с этим имеется необходимость разработки устройств дополнительной очистки воды с доведением их качеств до санитарно-гигиенических норм.

Глубокая очистка природных и промышленных сточных вод от минеральных, органических и биологических загрязнений в настоящее время является актуальной задачей, особенно на урбанизированных территориях, где интенсивно развивается промышленность и растёт антропогенное и техногенное загрязнение водных ресурсов. Ионного обмена, коагуляции, адсорбции на углях и мембранных методов очистки, обычно применяемых в схемах водоподготовки и водоочистки промышленных стоков, бывает недостаточно, поэтому удаления органических соединений можно достичь путём озонирования сточных вод.

**Цель работы.** Исследовать способы совершенствования и разработать устройства озонной технологии для очистки сточных вод ТЭС до уровня пригодного для санитарно-гигиенических нужд и питьевой воды.

**Задачи исследования.** В соответствии с поставленной целью определены следующие научные задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

1. Выполнить анализ процессов и аппаратов для выработки озона и его применений, а также известных способов и устройств озонной технологии для очистки сточных вод сложного состава.

2. Разработать и испытать озонирующие элементы на коронном разряде (коронирующая проволока - цилиндр) с внешними электродами с различной конфигурацией.

3. Разработать и испытать новые модификации озонаторов на коронно-барьерном разряде.

4. Исследовать механизмы образования, роста и отрыва пузырьков газа от газопроницаемой стенки реактора с обрабатываемой жидкостью.

5. Разработать эжекционный проточный реактор для озонной обработки сточных вод.

6. Разработать способ и устройство для измерения размеров пузырьков газа и для контроля степени их насыщенности в жидких средах.

7. Разработать экспериментальную установку для озонной обработки сточных вод и провести испытания её по выбору оптимального режима озонирования жидкости.

**Объект исследования.** Объектом исследования является сточные воды ТЭС г. Алматы, содержащей стойкие органические загрязнения и примеси ионов тяжелых металлов.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовались экспериментальные методы исследования коронного разряда и теории по расчету электрических полей коронирующего электрода, причем обработка первичной информации, полученной в опытах, выполнялась на основе математической статистики с использованием компьютерных программ.

**Научную новизну работы составляют:**

1. Впервые выполнен расчет коэффициента использования конструкции (КИК) озонирующего элемента на коронном разряде, обеспечивающий повышение выхода озона при оптимальном выборе геометрии расположения электродов разрядного промежутка.

2. Впервые выполнен расчет высокочастотного электрического поля на коронирующей проволоке озонатора на коронно-барьерном разряде, позволивший выбор необходимых параметров озонирующего элемента для стабилизации режима разряда.

3. Результаты исследования механизмов образования, роста и отрыва пузырьков газа от газопроницаемой стенки реактора с обрабатываемой жидкостью.

4. Выполненное математическое описание процессов эжекции озоновоздушной смеси в проточный реактор в виде пузырьков газа, что дало возможность реализовать комплексную технологию озонирования жидких сред, когда радиус пузырька  $r_0$  является определяющим.

### **Практическая значимость работы заключается в следующем:**

1. Разработана и испытана новая модификация озонатора на коронно-барьерном разряде, отличающийся от известных простотой конструкции, надежностью в работе и малыми удельными энергозатратами на выработку озона.

2. Разработаны способ для измерения размеров пузырьков газа и устройство для контроля степени их насыщенности в жидких средах.

3. Разработан эжекционный проточный реактор для озонной обработки сточных вод, использующий эффективность взаимодействия пузырьков газа с жидкостью.

4. Разработана экспериментальная установка для озонной обработки сточных вод и проведены ее испытания по выбору оптимального режима озонирования жидкости.

### **На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Методика расчета высокочастотного электрического поля на коронирующей проволоке озонатора на коронно-барьерном разряде.

2. Теоретическое обоснование механизмов образования, роста и отрыва пузырьков газа от газопроницаемой стенки реактора с обрабатываемой жидкостью.

3. Математическое описание процессов эжекции озоновоздушной смеси в проточный реактор в виде пузырьков газа в жидкости.

4. Экспериментальная установка для озонной обработки сточных вод и проведены ее испытания по выбору оптимального режима озонирования жидкости.

**Конкретное личное участие автора** в получении научных результатов заключается в следующем:

- постановке задач исследований и способов их реализации;
- разработке и изготовлении опытного образца озонатора высоковольтных импульсов для очистки сточных вод ТЭС и котельных;
- проведении экспериментальных исследований и опытных испытаний экспериментальные установки для озонной обработки сточных вод.

**Апробация работы:** Основные положения диссертации ежегодно начиная с 2010 года (каждый год) докладывались и обсуждались в Международных конференциях АУЭС, также:

1. T. Golubeva, S. Konshin, B. Aliyarov, S. Bahtaev, Samal Abdreshova. Environmental phenomena from the application of electrohydraulic effect for wastewater treatment. 18th IEEE International Conference on Environmental and Electrical Engineering 2nd Industrial and Commercial Power System Europe, in Palermo, Italy, June 12th-15th, 2018.

2. T. Golubeva, S. Konshin, B. Aliyarov, S. Bahtaev, I. Duisenbek, Samal Abdreshova. Electric power effect on the formation and disappearance of gas bubbles

in the ozone treatment of liquids. 18th IEEE International Conference on Environmental and Electrical Engineering 2nd Industrial and Commercial Power System Europe, in Palermo, Italy, June 12th-15th, 2018.

3. Aliyarov B.K., Bakhtaev Sh.A., Ongar B., Jesionek K., Abdreshova S. The wastewater treatment with using ozone technologies. 7<sup>th</sup> International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, TE-RE-RD 2018, Drobeta Turnu Severin, 31 may-2june 2018, p.1-6.

4. T. Golubeva, S. Konshin, B. Aliyarov, S. Bahtaev, Samal Abdreshova, V. Tailakov. A Mobile Data Transfer in Energy-Efficient Intelligent Systems for Wastewater Treatment of Thermal Power Plants. Conference: 2018 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Barcelona, Spain, p.164-169.

**Публикации.** По основным результатам выполненных исследований и разработок подготовлены и опубликованы более 34 научных работ, в том числе 2 предпатента и 6 инновационных патента, из них 5 работ опубликованы в изданиях входящих в международную базу Scopus, 12 работ опубликованы в изданиях рекомендованных комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК.

**Структура и объем диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов основного содержания, заключения и приложений, библиографического списка из 213 наименований и содержит 221 страниц, 63 рисунков и 35 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, практическая значимость и приведены основные положения работы, выносимые на защиту.

**В первом разделе** описаны основные принципы получения и применения озона для очистки сточных вод, присутствующих во всех производственных циклах промышленности.

Озонная технология в нашей республике находится в зачаточном состоянии, в то время как в развитых странах эта технология получила широкое распространение и используется в различных отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и здравоохранении.

Важность и актуальность развития инфраструктуры применения озонной технологии для решения экологических проблем в стране определяют необходимость проведения широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в этом направлении и создания научно-технических основ озонной технологии для химико-металлургических процессов, очистки промстоков фабрик и заводов и для обеззараживания больших объемов питьевой воды (горводопровод). В этой связи особую значимость приобретают

вопросы разработки высокоэффективных генераторов озона для создания новых процессов и аппаратов озонной технологии.

В разделе сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования, а также обоснованы направления исследований и общая методика проведения научно-исследовательской работы.

**Во втором разделе** разработаны и испытаны озонирующие элементы на коронном разряде при различных конфигурациях коаксиально расположенных коронирующего и, внешнего электродов, причем диаметры коронирующего электрода в виде металлической нити изменялись в диапазоне от 75 мкм до 150 мкм, а высоты микровыступов нанесенных на поверхности нити составляли 10÷60 мкм. Испытаны озонирующие элементы с внешними перфорированными электродами в форме спирали, сетки и цилиндра с равномерно расположенными отверстиями.

Выполнен расчет коэффициента использования конструкции (КИК) озонирующего элемента в виде коаксиальных цилиндров (металлическая коронирующая нить – внешний цилиндр), что подобен нахождению КПД работы озонатора, и, на основе расчетных данных КИК определены оптимальные геометрические параметры озонирующего элемента с повышенным выходом озона.

Для практики важно знать, при каком напряжении и давлении в озонаторе происходит пробой. Допустим, что воздух или кислород пробивается при определенном значении напряженности, существующего в нем электрического поля. Назовем эту напряженность предельной напряженностью и обозначим  $E_{пр}$ .

В случае плоского конденсатора, в котором поле однородно пробой наступит, когда  $E$  достигнет значения  $E_{пр}$ , и пробивное напряжение  $U_{пр}$  определится из уравнения

$$U_{пр} = E_{пр} \cdot a, \quad (1)$$

где  $a$  – расстояние между пластинами.

Допуская, что в случае неоднородного поля пробой наступает, как только в какой-нибудь точке поля напряженность достигнет предельного значения, при расчете пробивного напряжения, произведенном на основе этих допущений, имеет практический смысл введение коэффициента использования конструкции (КИК)  $\eta$ , возможного КПД конструкции коронноразрядного озонатора.

Исходя из того, что озонатор любого типа является конденсатором, а в нашем случае рассматривается конструкция «цилиндр внутри цилиндра», то максимальное значение напряженности поля принимает при  $x = r$  (рисунок 1), т.е. на поверхности внутреннего цилиндра:

$$E_{max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}. \quad (2)$$

Вводя геометрическую характеристику

$$p = \frac{r+a}{r} = \frac{R}{r}, \quad (3)$$

получим для пробивного напряжения

$$U_{пр} = E_{пр} \cdot r \cdot \ln p. \quad (4)$$

Так как пробивное напряжение при постоянной геометрической характеристике пропорционально радиусу внутреннего цилиндра, то фиктивное расстояние цилиндрического конденсатора равняется

$$\alpha = r \cdot \ln p. \quad (5)$$

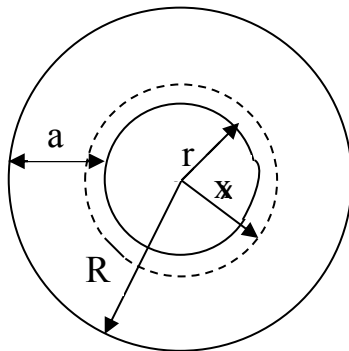


Рисунок 1 – Сечение цилиндрического конденсатора

Для определения коэффициента использования конструкции имеем уравнение

$$\eta = \frac{\alpha}{a} = \frac{r}{(a+r)-r} \ln p = \frac{1}{p-1} \ln p \quad (6)$$

И в этом случае коэффициент использования конструкции зависит только от геометрической характеристики.

Пользуясь коэффициентом использования конструкции можно найти пробивное напряжение по формуле

$$U_{пр} = E_{пр} \cdot a \cdot \eta. \quad (7)$$

Экспериментально исследованы вольтамперные характеристики, начальные и пороговые напряжения коронного разряда отрицательной полярности для двух конструкций озонирующего элемента: цилиндрического конденсатора и со спиральной конструкцией внешнего перфорированного электрода, причем экспериментальные данные по выходу озона при перпендикулярной подаче воздуха через внешний перфорированный электрод показали, что выход озона увеличился на 10-25%, а удельный расход электроэнергии на получение озона составляет 6,5-8,3 кВт час на 1 кг  $O_3$ .

Разработаны и испытаны новые модификации озонаторов на коронно-барьерном разряде, отличающиеся от известных простотой конструкции, надежностью в работе и малыми удельными энергозатратами на выработку озона. В этом случае, коронирующая проволока спирально намотана на

диэлектрическую трубку (барьер), внутри которой расположен соосно второй внешний электрод в виде цилиндра и в связи с подачей высокочастотного высоковольтного напряжения на этот электрод обеспечивается электробезопасность озонатора в целом. Кроме того, выполненный расчет электрического поля в области расположения спирали коронирующей проволоки позволил найти значения напряженностей поля в «особых» точках образования озона вблизи проволоки.

С целью разработки озонно-реагентных технологий для очистки сточных вод выполнен анализ всех возможных примесей в сточных водах с разделением их на 4 группы и процессов, используемые для их удаления. Кроме того, разработана и испытана технология очистки сточных вод с применением электрогидравлического эффекта, в которой окислительно-восстановительные реакции протекают с использованием электронов, ионов и свободных радикалов и вовсе не оставляют балластные нагрузки в очищаемой жидкости.

**В третьем разделе** из геометрического построения пузырька газа определены объем и площадь поверхности для двух видов пузырька газа (вертикальная и горизонтальная поверхности). Получены расчетные значения действующих сил на пузырек газа, причем преобладающими из них являются силы прилипания и архимедова сила. Установлено, что условие равновесия пузырьков газа на вертикальной поверхности электрода определяется значением тангенса угла между направлением равнодействующей силы и поверхностью электрода.

Разработан эжекционный проточный реактор, который совместно с коронноразрядным озонатором позволяет произвести непрерывную озонную обработку жидкости (питьевая или сточная воды) в процессе ее протока через трубу реактора. Ввиду того, что все процессы взаимодействия озонозодушной смеси протекают на границе «газ-жидкость» пузырьков газа были определены оптимальные варианты выбора параметров пузырьков газа. Выполнены теоретические выкладки для определения критического радиуса пузырька, время жизни газового пузырька на газопроницаемой поверхности, а также объем пузырька в момент отрыва. Следует отметить, что в целом, расчетные значения расходов озонозодушной смеси близко соответствуют экспериментальным данным.

Разработаны способ и устройство для получения озона в пузырьках газа в электропроводящих жидкостях (водные растворы, кислотные и щелочные соединения), насыщенных пузырьками газа. При этом, мало живущие активные компоненты кислорода, в том числе озон, успевают среагировать с жидкостью, что соответственно интенсифицирует процесс очистки сточных вод.

Разработан способ измерения размеров пузырьков газа в жидкости, который наиболее эффективен при измерении размеров одиночных пузырьков газа в жидкости, в то время как в случае насыщенных пузырьками газа потока в

процессах очистки воды он может быть использован для определения среднестатистического размера пузырьков.

Разработано устройство для получения озона в пузырьке газа в жидкости, обеспечивающее стабильность режима коронного разряда в пузырьке газа и полноту взаимодействия озона и других высокоактивных атомов, и молекул кислорода с обрабатываемой жидкостью.

В разработанном устройстве, газовые пузырьки образуются при продувке атмосферного воздуха через отверстие, расположенного на дне емкости с обрабатываемой жидкостью. При этом создаются такие условия, когда наиболее вероятно образование одинаковых по размерам пузырьков газа в жидкости. Если в случае на образования, роста и отрыва пузырьков газа с твердой поверхности, например, при электролизе, действуют различные силы (силы прилипания, архимедова сила и др.), то в нашем случае, размеры пузырьков газа и их частота появления будут зависеть в основном от значения диаметра отверстия и величины избыточного давления продуваемого воздуха.

При подаче воздуха через отверстие образующийся газовый пузырек соединен с верхней кромкой отверстия шейкой. Максимальный размер пузырька определяется условием равновесия подъемной силы и силы поверхностного натяжения. Считая пузырёк сферическим, получаем

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) = 2\pi r_0 \sigma, \quad (8)$$

где  $r$  – радиус сферического пузырька (м);  $g$  – ускорение свободного падения ( $10 \text{ м/с}^2$ );  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости (воды  $10^3 \text{ кг/м}^3$ );  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа (воздуха  $1.29 \text{ кг/м}^3$ );  $r_0$  – радиус отверстия (м);  $\sigma$  – поверхностное натяжение (воды  $73.26 \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$ ).

Отсюда

$$r = \sqrt[3]{\frac{3\sigma r_0}{2g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}}. \quad (9)$$

С опытными данными лучше согласуется следующее выражение, отличающееся от (2) лишь числовым коэффициентом

$$r = \sqrt[3]{\frac{\sigma r_0}{g\rho_{\text{ж}}}} \quad (10)$$

в записанной формуле учтено, что  $\rho_{\text{г}} \ll \rho_{\text{ж}}$ .

Следует отметить, что выражение (10) не учитывает инерционных сил, обусловленных динамическим воздействием потока газа, вытекающего из отверстия, т.е. оно справедливо при малой скорости образования пузырьков.

На рисунке 2 представлена функциональная схема устройства, которое обеспечивает получение озона в пузырьке газа в электропроводящих жидкостях. Устройство содержит следующее: 1 – отверстие, расположенное на дне емкости с обрабатываемой жидкостью, 2 – коронирующий электрод в виде металлической иглы с оголенным кончиком, 3 – крепление электрода, 4 –



трубка с изоляционного материала для продувки атмосферного воздуха 5 через отверстие, 6 – обрабатываемая жидкость, 7 – форма пузырька газа, его зарождение и рост, 8 – дно емкости с обрабатываемой жидкостью. Кроме того, на чертеже обозначены: ГВИ – генератор высоковольтных импульсов, СВ – схема запуска,  $r$  – радиус пузырька газа,  $r_0$  – радиус отверстия,  $r_0/2$  – расстояние кончика электрода до отверстия,  $R_6$  – балластное сопротивление.

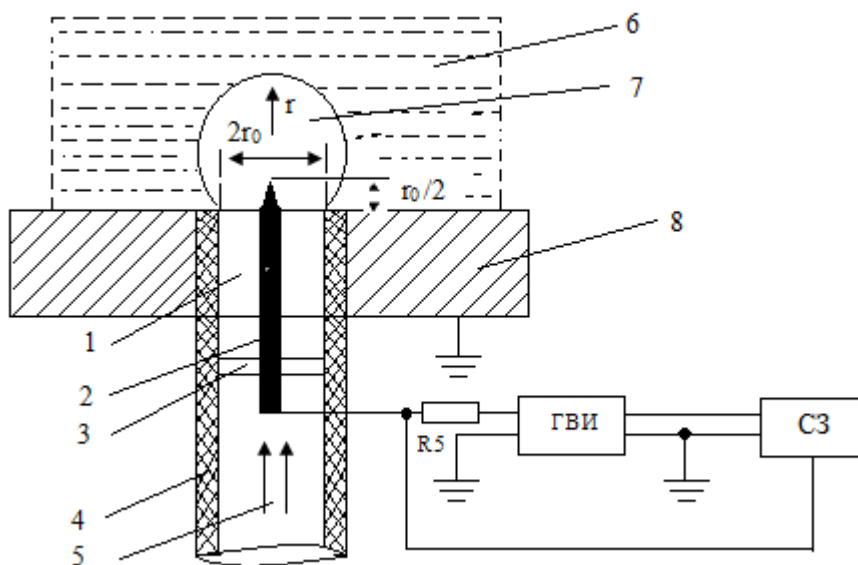


Рисунок 2

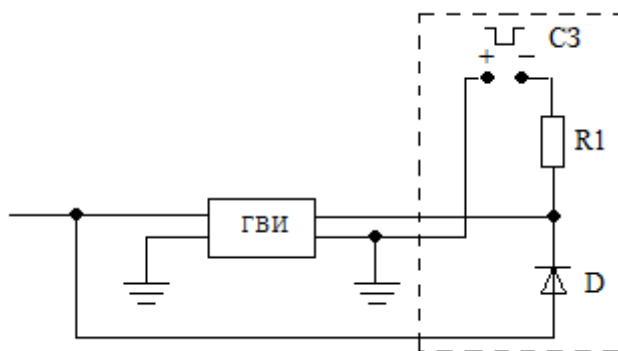


Рисунок 3

На рисунке 3 приведена схема запуска СЗ. Она состоит из источника питания постоянного тока  $U$ , нагрузочного сопротивления  $R_1$  и высоковольтного диода  $D$ .

Расчетные значения зависимости  $r$  от  $r_0$  по формуле (10) показаны на рисунке 4.

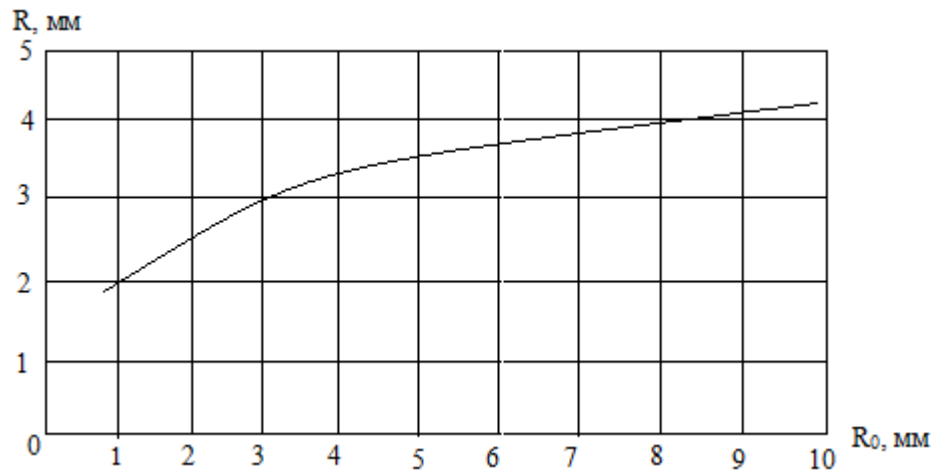


Рисунок 4

При отсутствии пузырька газа на кончике иглы коронирующий электрод закорочен через электропроводящую жидкость с земляной шиной источника питания. В этом режиме через коронирующий электрод, диод  $D$  и сопротивление  $R_1$  течет минимальный ток, значения которого будет соответствовать выходному напряжению источника питания  $U$ . Когда на острие электрода возникает пузырек газа, контакт острия с жидкостью резко срывается и прекращается течь ток в СЗ, что ведет к появлению на сопротивлении  $R_1$  напряжения, равное выходному напряжению  $U$  источника питания и достаточное по величине для запуска генератора высоковольтных импульсов ГВИ. При достаточно высоком напряжении отрицательной полярности на выходе ГВИ между коронирующим электродом и внутренней сферической поверхностью пузырька газа возникает отрицательный коронный разряд, который протекает до отрыва пузырька с острия электрода. После отрыва пузырька с острия, коронирующий электрод снова закорачивается через жидкость с земляной шиной и в этот момент напряжение на  $R_1$  в СЗ также спадает до минимума. Таким образом, наступает период ожидания возникновения следующего пузырька газа. При появлении пузырька газа на острие коронирующего электрода весь процесс повторяется заново.

Как видно из графика на рисунке 4 корректность формулы (10) сохраняется до  $R = 3$  мм, т.е. образованные газовые пузырьки имеют большие диаметры чем само отверстие. Дальше, вплоть до 10 мм, пузырьки имеют меньшие диаметры чем отверстие, что не соответствует действительности. Это связано с тем, что при выводе формулы (10) форму пузырька было принято считать сферической. Опытные данные подтверждают сферичность формы образованных пузырьков газа только до диаметра 3 мм.

Коронирующий электрод представляет собой проволоку из нержавеющей стали диаметром 1 мм, которая помещена в стеклянный капилляр и конец ее затуплен под полушар с радиусом кривизны 0,5 мм. Высокое напряжение на

выходе ГВИ составило 5,4 кВ, а напряжение источника питания в СЗ – 100 В. Пузырьки воздуха создавались с помощью микрокомпрессора при продувке атмосферного воздуха через трубку с изоляционного материала (4) в отверстие (1).

Опытные испытания устройства показали следующее. При отсутствии пузырька газа на острие электрода через электрод и жидкость протекает ток схемы запуска (СЗ), ограничивающихся нагрузочным сопротивлением  $R_1$ . Когда зарождается пузырек газа на острие электрода ток СЗ прекращается и на  $R_1$  появляется скачок потенциала, равный напряжению источника питания СЗ –  $U$ . Этот потенциал позволяет запустить ГВИ, что обеспечивает появлению коронного разряда, вокруг острия электрода. При испытании устройства было установлено, что в начальный момент появления высоковольтного импульса (фронт импульса) происходит электрический пробой разрядного промежутка, так как только что зарождается пузырек на острие электрода и поэтому, расстояние между электродом и внутренней поверхностью пузырька очень мало (меньше 1 мм). Затем, с ростом размеров пузырька постепенно устанавливается стабильный режим коронного разряда. Для предотвращения короткого замыкания выхода ГВИ при первоначальном пробое используется балластное сопротивление  $R_6$ .

Таким образом разработанное устройство для получения озона в пузырьке газа в жидкости, обеспечивает одновременность образования пузырька газа и возбуждения коронного разряда в нем, что позволяет при обработке жидкости использовать кроме озона и другие высокоактивные компоненты кислорода.

**В четвертом разделе** разработан и испытан озонатор нового типа на коронно-барьерном разряде, который отличается от известных озонаторов типа ОКР своим высоким удельным энергетическим выходом озона, простотой конструкции и надежностью в работе. Проведены экспериментальные исследования установки озонирования воды. Экспериментальным путем определены производительность и удельный энергетический выход озона. По предложенной технологической схеме озонирования проведены опытные испытания в производственных условиях.

Для исследования электрических и озоновых характеристик озонатора была разработана и собрана экспериментальная установка. На рисунке 5 приведена структурная схема экспериментальной установки для очистки сточной воды. Устройство содержит компрессор, расходомер воздуха (ротаметр) с максимальной продувкой 73 л/мин, озонатор, в качестве которого используется разработанный автором образец ОВИ–2, напряжение питания на который подается через высоковольтный автотрансформатор, который подключен к сети переменного тока ~220 В, блок питания (БП), озонметр, испытательное звено. Для измерения концентрации озона используется газоанализатор «ОЗОН-5-200».

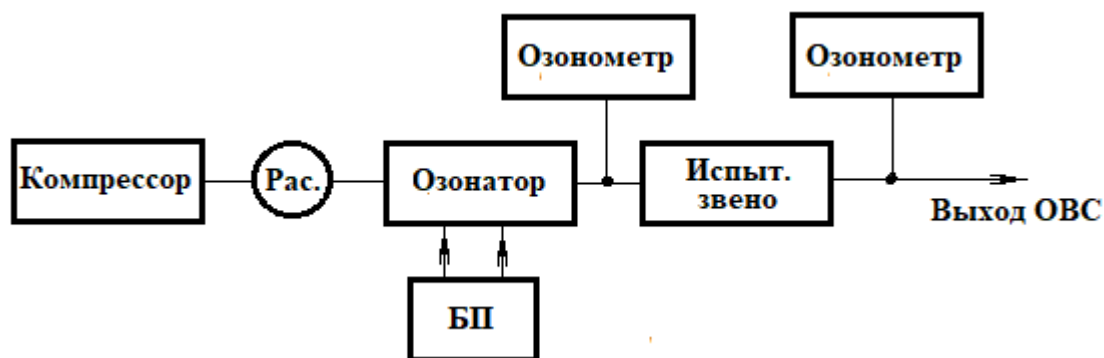
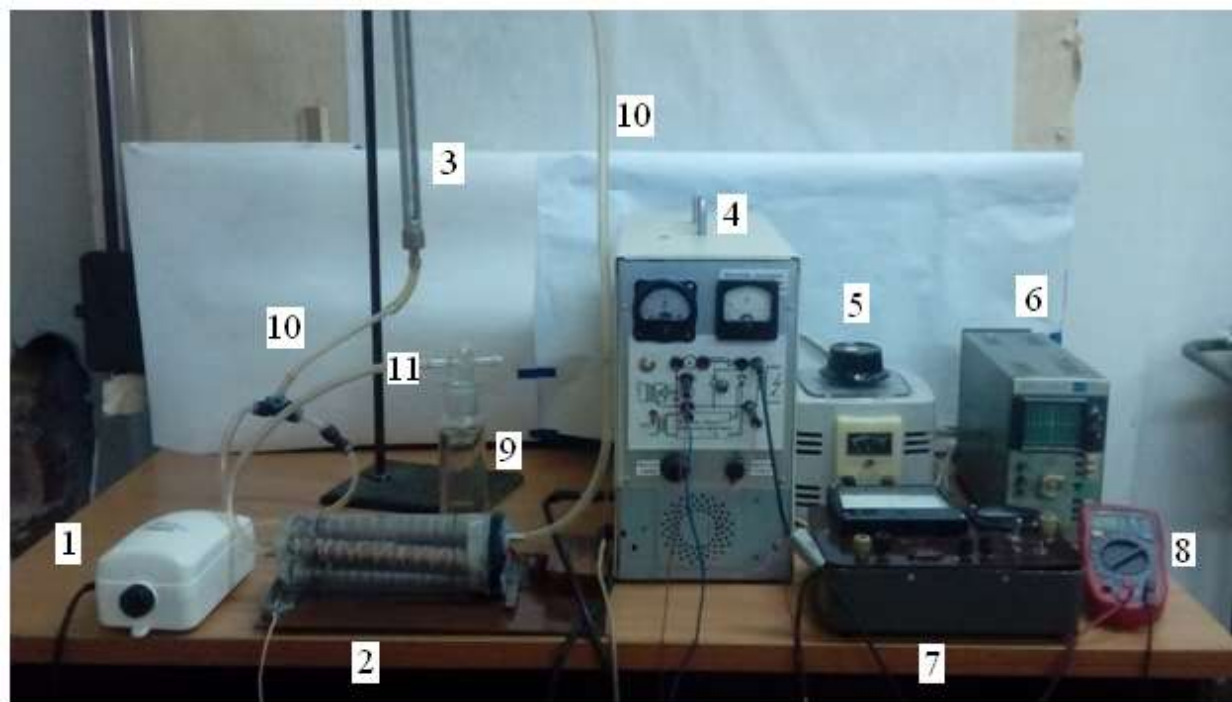


Рисунок 5 – Структурная схема экспериментальной установки

Устройство работает следующим образом. Атмосферный воздух нагнетается с помощью компрессора в озонатор, на выходе которого образуется озонозудная смесь, поступающая в емкость со сточной водой.



1 –компрессор; 2 –озонаторная ячейка; 3 – ротаметр; 4 – высоковольтный тиристорный инвертор; 5 – лабораторный автотрансформатор; 6 –осциллограф; 7 – аналоговый вольтметр; 8 – цифровой мультиметр; 9 – резервуар со сточной водой; 10 –озоностойкие трубки; 11 –газоанализатор ОЗОН-5-200.

Рисунок 6 – Экспериментальная установка

На рисунке 7 показан фрагменты озонаторной установки, где 2 – озонаторные ячейки; 11 – блок газоанализатора.

Разработан опытный образец озонатора ОВИ-2, имеющий следующие технические параметры:

Напряжение электросети	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	65 Вт
Обрабатываемый объем воды	до 2 куб.м
Время однократного действия	от 10 минут
Габариты	240x210x110 мм
Масса	4,5 кг

В экспериментальном стенде используется озонатор ОВИ-2 разработанный, на основе коронно-барьерного разряда, что позволяет применить один источник питания высоковольтного напряжения.



2 – озонаторные ячейки; 11 – блок с газоанализатором ОЗОН-5-200.

Рисунок 7 – Озонаторные ячейки

В таблице 1 приводятся технические данные озонаторов, разработанных при непосредственном участии автора.

Таблица 1 – Технические данные малогабаритных озонаторов

Тип озонатора	Разработчик	Производительность озона, г/ч	Напряжение, кВ	Мощность, Вт	Энергетический выход озона, г/кВт·ч	Год создания
ОКБР-01	КазНТУ	1	4	40	61	2001
ОВИ-1	КазНТУ	0,5	3	150	56,1	2008
ОВИ-2	АУЭС	2	2,7	65	59	2018

Из таблицы 1 видно, что все они имеют ряд преимуществ по напряжению коронного разряда, потребляемой мощности, малым габаритам, тем что не требуют специальной воздухоподготовки – а это приводит к снижению капитальных затрат при внедрении установки на производстве.

### Электрические и озоновые характеристики озонатора

Вольтамперная характеристика важна для выбора электрических параметров озонирующего элемента озонатора. Для измерения значений токов и напряжений импульсных сигналов использовался осциллографический метод с применением делителей и нагрузок из образцовых сопротивлений. Как следует из вольтамперной характеристики микропровода начинает коронировать с напряжения  $U_{кор} = 0,7$  кВ. Присутствие тока озонатора до этого напряжения объясняется наличием межэлектродной геометрической емкости.

К озоновым характеристикам относятся производительность озонатора по озону (г/ч) и удельные энергетические выходы озона (г/кВт\*ч). Кроме того, одним из характерных параметров озонатора является объемная концентрация озона в озоновооздушной смеси на выходе ( $K_{O_3}$ , мг/л). В таблице 2 приведены выходные данные озонатора.

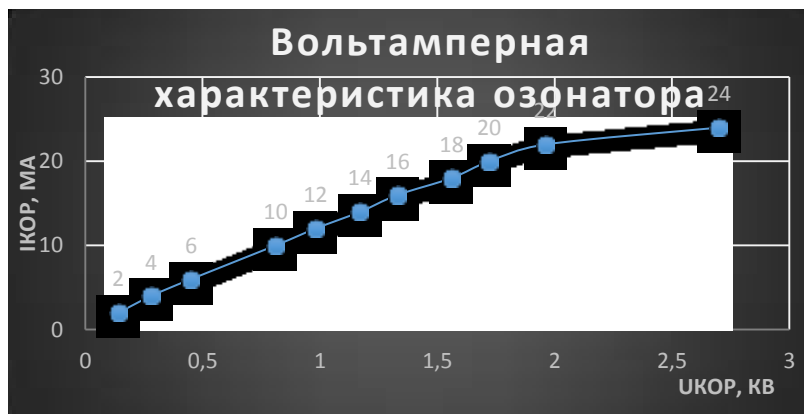


Рисунок 8 – Вольтамперная характеристика озонатора ОВИ-2

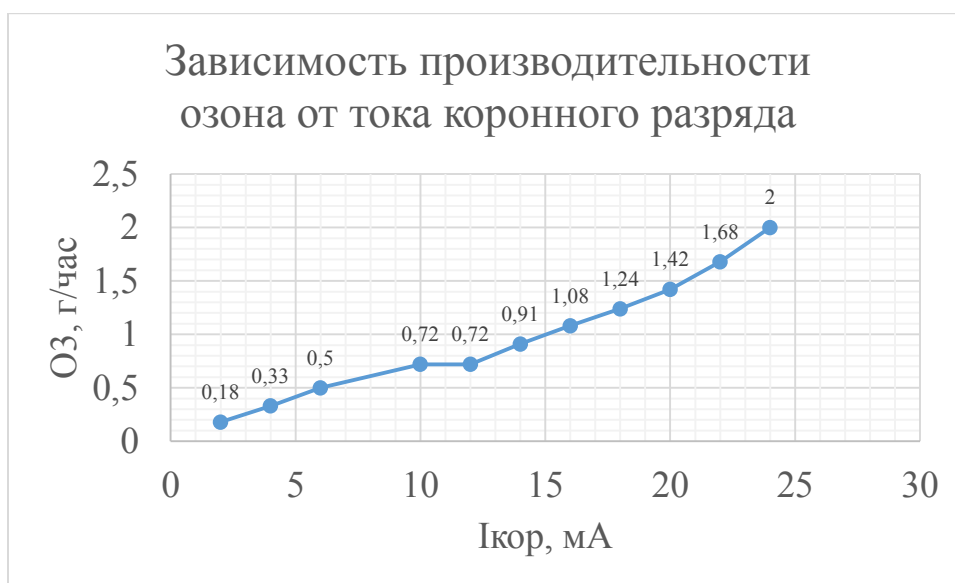


Рисунок 9 – Озоновая характеристика озонаторной ячейки

Таблица 2 – Выходные данные озонатора

U <sub>к</sub> , кВ	0,14	0,28	0,45	0,81	0,98	1,17	1,33	1,56	1,72	1,96	2,7
I <sub>к</sub> , mA	2	4	6	10	12	14	16	18	20	22	24
P <sub>пот</sub> , Вт	0,28	1,12	2,7	8,1	11,76	16,38	21,28	28,08	34,4	43,12	64,8
O <sub>3</sub> , г/ч	0,1	0,2	0,35	0,54	0,72	0,91	1,08	1,24	1,42	1,68	2
O <sub>3</sub> , г/кВтч	65	64,2	63	62,4	59	54,54	53,02	48,54	47,85	47,03	45,01
K <sub>O<sub>3</sub></sub> , мг/л	0,1	0,75	1,32	1,98	2,64	3,3	3,96	4,62	5,39	6,16	6,6

В этой таблице с помощью газоанализатора «ОЗОН-5-200» были определены производительности озонатора (г/ч) при различных токах, а затем по электрическим характеристикам были рассчитаны удельные энергетические выходы озона (г/кВт\*ч). По показаниям ротаметра были определены объемные концентрации озона K<sub>O<sub>3</sub></sub> на выходе озонатора.

### **Результаты исследования процессов озонной очистки сточных вод от нефтепродуктов**

Известные научные исследования удаления нефтепродуктов из воды указывают на то, что эффект окисления озонем загрязняющих веществ на основе нефти связано с температурой воды, pH, дозировкой озонем и временем реакции.

Эффективность удаления нефтепродуктов достигает 83% при условии, что отношение количества озона к нефтяной основе загрязняющих веществ составляет 1:1 и время реакции составляет 10 минут. Таким образом, озон оказывается прекрасным решением для удаления загрязняющих веществ на основе нефти и его использование в обработке нефтяных стоков оказывается

эффективным. Окисления озонем включает в себя непосредственную реакцию и непрямую реакцию. Скорость реакции связана с концентрацией загрязняющих веществ, озона и ОН.

Содержание нефтепродуктов снижается с 5,0 мг/л до 0,1 мг/л, а средняя эффективность удаления равна 92,50% после обработки озонем. Озон оказался настолько мощным, что окисление может изменить состав и структуру нефти и окислять высокие молекулярные органические вещества в низкомолекулярных органических соединениях и даже разложить некоторые органические вещества непосредственно в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

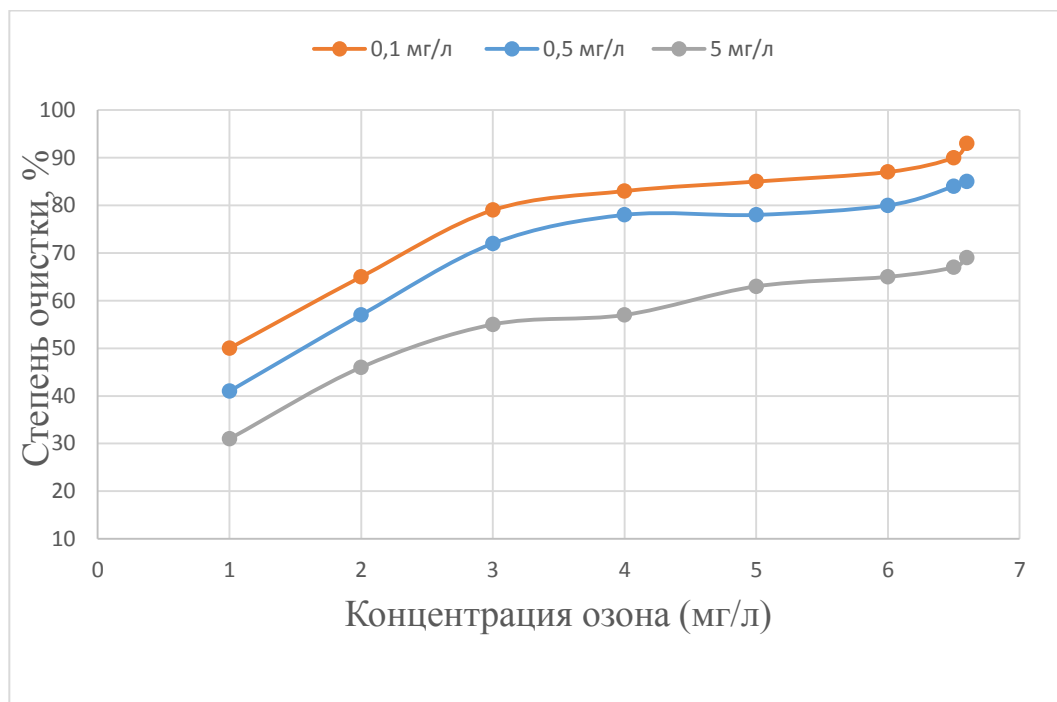


Рисунок 10 – Влияние дозировки озона на окисление нефти



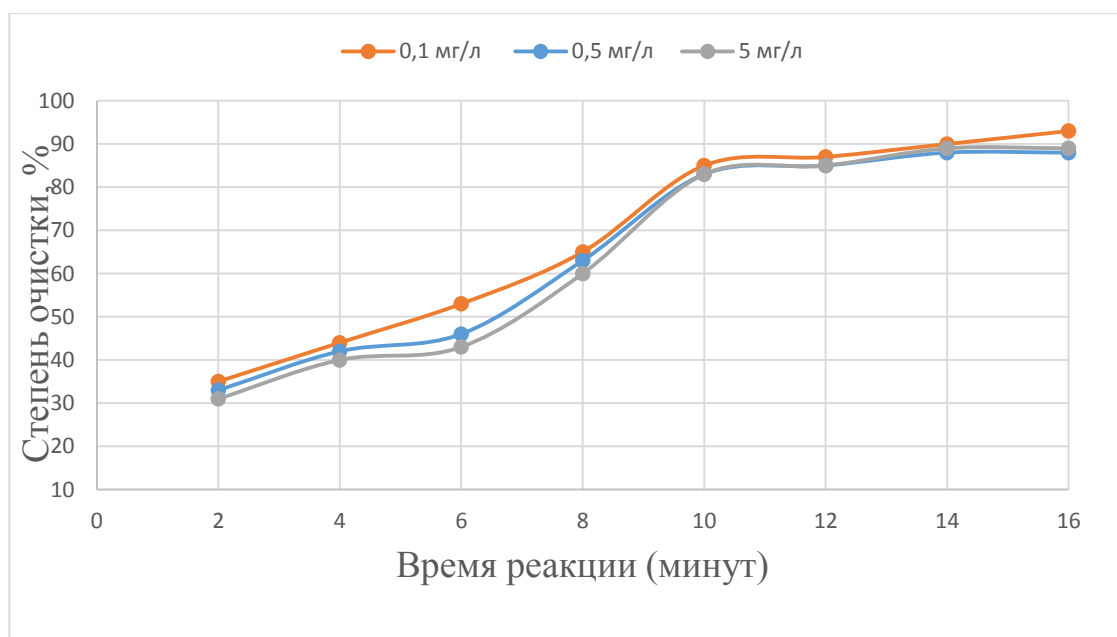


Рисунок 11 – Влияние времени реакции на окисление нефти

Разработанный озонатор был испытан при очистке озоном нефтесодержащих сточных вод. Испытания озонатора показали, что озон имеет отличный эффект удаления нефтепродуктов из воды в условиях 23°C, pH 7,2, 4,0 мг/л озона и времени реакции 10 мин (при тестовой концентрации загрязнителя). Содержание нефтепродуктов снижается с 5,0 мг/л до 0,1 мг/л, а средняя эффективность удаления равна 92,50% после обработки озоном.

#### Анализ и обработка результатов исследования

Анализы результатов загрязненной и озонированной воды, провела в Аналитической лаборатории ТОО «КАЗЭКОАНАЛИЗ», подтверждаются протоколами испытаний №211-01 от 28.18.2018г.

Таблица 3 – Результаты испытаний

ВОДА	На входе ОЧС МХ	На выходе ОЧС МХ	До озонирования	После озонирования (время озонирования 10 минут)
Степень загрязнения /очистки воды	50 – 100 мг/л	0,5 – 1 мг/л	0,5 мг/л	0,1 мг/л

ОЧС МХ – очистное сооружение мазутного хозяйства

**В заключении** диссертации по результатам представленных и обсуждённых разработок и исследований сформулированы основные выводы работы.