

С. Н. Антонов

А. И. Адошев

И. К. Шарипов

В. Н. Шемякин

**АППАРАТЫ МАГНИТНОЙ
ОБРАБОТКИ ВОДЫ.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ИССЛЕДОВАНИЕ**

2014

УДК 621.318.38
ББК

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Физика»
ФГБОУ ВПО АЧГАА
Н.В. Ксенз

доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования»
ФГБОУ ВПО СтГАУ
В.Я. Хорольский

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
«Теоретические основы электротехники»
ФГБОУ ВПО СтГАУ
А.Ф. Шаталов

Антонов, С. Н.

Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование: / С. Н. Антонов, А. И. Адошев, И. К. Шарипов, В. Н. Шемякин – Ставрополь:, 2014 – 220 с.

В монографии изложены положения по проектированию, моделированию и исследованию аппаратов магнитной обработки воды. Рассмотрены способы водоподготовки в котельных, конструкции аппаратов. Приведены методы расчета магнитных полей. Представлена оптимизация конструктивных параметров аппарата с моделированием в программном комплексе ElCut. Проведены исследования эффективности обработки аппаратом магнитной обработки воды.

ВВЕДЕНИЕ

Появление накипи на поверхностях теплоэнергетического оборудования обусловлено содержанием в воде минеральных солей магния и кальция. Этот аспект является наиболее актуальной проблемой в теплоэнергетике, промышленности и жилищно-коммунальном комплексе. Необходимо отметить, что слой накипи толщиной 1 мм приводит к перерасходу топлива на нагрев теплоносителя от 5 до 10 %. При эксплуатации системы теплоснабжения в течение длительного промежутка времени из-за образования накипи, общие потери энергии могут достигать 60 %. Учитывая Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», необходимо проводить мероприятия по ежегодной экономии энергетических ресурсов. Устранить проблему образования накипи, тем самым увеличить эффективность энергоустановки, возможно двумя методами: химическим (реагентным) и физическим (безреагентным).

В основе химического метода лежит принцип ионного обмена. Недостаток метода – изменение химического состава воды.

Из всех физических методов наибольшее распространение получил магнитный метод обработки.

Процесс магнитной обработки водных систем до настоящего времени считается изученным не до конца и, соответственно, вопрос снижения накипеобразования с использованием магнитной водоподготовки не решен окончательно. В связи с вышесказанным, появляются новые теории процесса воздействия магнитного поля на воду, новые конструкции аппаратов магнитной обработки, способы определения эффективности воздействия на воду.

Учитывая вышесказанное, при принятии решения о возможном применении той или иной технологической схемы водоподготовки, необходимо решить ряд задач. Эти задачи, часто носят научно-исследовательский характер. Связано это, прежде всего, с подбором электромагнитных характеристик аппаратов эффективно воздействующих на воду. Свойства воды, как в течение года, так и в разрезе нескольких лет, не остаются постоянными, а изменяются циклично с возможными отклонениями как природные явления в целом.

Предлагаемая монография рассматривает такие вопросы как: способы и технологические схемы водоподготовки; существующие аппараты магнитной обработки воды; методы расчета магнитных полей аппаратов; разработка, моделирование и оптимизация параметров аппарата магнитной обработки; проведение экспериментальных исследований аппаратов.

1 ВОДОПОДГОТОВКА В КОТЕЛЬНЫХ

1.1 СПОСОБЫ ВОДОПОДГОТОВКИ В КОТЕЛЬНЫХ

Источниками водоснабжения отопительных котельных могут служить поверхностные воды озер, рек и искусственных водохранилищ, а также подземные воды из артезианских скважин. Поверхностные воды всегда содержат растворенные вещества и нерастворенные механические примеси. Подземные воды обычно бывают прозрачными и практически не содержащими механических примесей. Солеосодержание подземных вод, как правило, выше, чем поверхностных. Наибольшее значение для водоснабжения котельных установок имеют поверхностные воды рек и озер. Расход и качество речной воды изменяется циклично не только по времени года, но и в многолетнем разрезе. В зависимости от характера использования воды различными потребителями определяются и показатели, необходимые для качественной и количественной характеристики воды. Одним из показателей воды для использования ее в водогрейном оборудовании является жесткость.

Общей жесткостью воды J_0 называется суммарная концентрация ионов кальция и магния, выражаемая в мг-экв/кг, а при малых значениях – в мкг-экв/кг. По определяющему катиониту общая жесткость воды подразделяется на кальциевую J_{Ca} и магниевую J_{Mg} [93]. Часть общей жесткости, эквивалентная концентрации бикарбонат-ионов в воде, называется карбонатной жесткостью J_k , а остальная часть, эквивалентная содержащимся в воде другим анионам (Cl^- , SO_4^{2-} , и др.), называется некарбонатной жесткостью $J_{нк}$.

По значению общей жесткости (мг-экв/кг) природные воды классифицируются следующим образом: $J_0 < 1,5$ – воды с малой жесткостью; $J_0 = 1,5-3,0$ – воды со средней жесткостью; $J_0 = 3-6$ – воды с повышенной жесткостью; $J_0 = 6-12$ – воды с высокой жесткостью; $J_0 > 12$ – воды с очень высокой жесткостью.

Возможность применения магнитной обработки, место установки аппарата и достигаемый эффект зависят от качества исходной воды. К качеству воды, подлежащей обработке, предъявляются определенные требования, вода не должна содержать механических примесей больше установленных норм и агрессивную двуокись углерода. Присутствие в воде агрессивной двуокиси углерода снижает противонакипный эффект пропорционально ее концентрации из-за снижения пересыщения. При концентрации агрессивной двуокиси углерода 10-15 мг/кг, противонакипный эффект снижается на несколько процентов, а при концентрации 30 мг/кг уменьшается не менее чем вдвое. Наибольшее снижение эффекта происходит при проточной системе движения воды (котлы, теплообменники).

В циркуляционных системах охлаждения при многократном контакте воды с магнитным полем присутствие агрессивной двуокиси углерода заметного влияния на эффект омагничивания не оказывает.

Вопрос о необходимости предварительной декарбонизации решается конкретно для каждой установки. Если в ходе производственного процесса происходит снижение концентрации двуокиси углерода, то магнитный аппарат устанавливают в том месте, где агрессивная двуокись углерода отсутствует или количество ее минимально.

Снижение общего количества двуокиси углерода, в том числе и агрессивной, может быть достигнуто продуванием через воду воздуха или ее подогревом до температуры 40-50 °С. В тех же случаях, когда такую обработку провести не представляется возможным, изменение концентрации двуокиси углерода может происходить при нагревании воды в замкнутой системе.

Обязательным условием при обработке воды является карбонатная жесткость. При значениях до 1,5 мг-экв/л применение магнитного поля малоэффективно и не целесообразно. Снижение противонакипного эффекта наблюдается в весенний период, когда поверхностные воды разбавлены талой водой. В летний период эффект улучшается и достигает максимума в зимнее время – в период наибольшей концентрации солей, что связано с состоянием системы, близкой к пересыщению.

Для промышленных котлов с рабочим давлением до 15 атм. при докотловой обработке, общая жесткость питательной воды не должна превышать 0,7 мг-экв/л. При внутрикотловой обработке общая жесткость питательной воды не должна превышать 5 мг-экв/л.

Многообразие примесей в природной воде служит причиной того, что очистка добавочной воды, для подпитки котлов на водоподготовительной установке организуется в несколько этапов, согласно [112]. На первом этапе методом осаждения из воды выделяются грубодисперсные вещества. Окончательная очистка от осадка осуществляется при помощи процесса фильтрования:

- через однослойные механические фильтры с загрузкой антрацита крупностью 0,5 - 1,2 мм для вод с содержанием взвешенных веществ до 50 мг/кг;
- через двухслойные механические фильтры с загрузкой кварцевого песка крупностью 0,5 - 1,2 мм и антрацита крупностью 0,8 - 1,8 мм для вод с содержанием взвешенных веществ до 100 мг/кг.

Если очистка воды от грубодисперсных примесей, имеющих заметный гравитационный эффект, может быть осуществлена обычным отстаиванием, то выделение коллоидно-дисперсных веществ из воды требует применения процесса коагуляции. Под коагуляцией понимают физико-

химический процесс слипания коллоидных частиц и образование грубодисперсной фазы с последующим ее выделением из воды.

Для улучшения работы ионообменной части водоподготовительных устройств, применяется известкование воды. В настоящее время основное назначение известкования - снижение бикарбонатной щелочности воды. Одновременно с этим уменьшаются жесткость, солесодержание, концентрация грубодисперсных примесей.

Вода, прошедшая предочистку, практически не содержит в себе грубодисперсных примесей и, в значительной степени, освобождена от коллоидных. Однако, основная часть примесей в растворенном состоянии остается в воде и должна быть удалена из нее. В настоящее время для этого применяют ионный обмен. Сущность ионного обмена заключается в использовании способности некоторых специальных материалов (ионитов) изменять в желаемом направлении ионный состав примесей воды.

В технологии водоподготовки для удаления ионов из воды, применяют два процесса [133]: катионирование - удаление катионов и анионирование - удаление анионов. Процессы ионирования осуществляют в различных аппаратах, но наибольшее распространение получили насыпные ионитные фильтры.

Na-катионирование – это процесс применяется для умягчения воды и имеет самостоятельное значение при подготовке воды с малой щелочностью для котлов низкого давления и подпитки теплосетей. Воду пропускают через слой катионита. При этом процессе происходит удаление из воды ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в обмен на эквивалентное количество ионов Na^+ .

H-катионирование – это процесс удаления всех катионов из воды с заменой их на ионы водорода. Оно применяется в схемах совместно с другими процессами ионирования для подготовки воды из артезианских или поверхностных вод при необходимости снижения относительной щелочности.

В последнее время получил распространение метод подготовки воды комплексонатами. Для обработки воды применяется ингибитор коррозии ОЭДФ-Zn. Его применение позволяет получить следующие результаты:

- защитить сталь от коррозии;
- постепенно отмыть существующие отложения;
- предотвратить образование новых накипей.

Данная технология получила распространение в Ростовской области и Ставропольском крае.

В настоящее время наиболее перспективным является обработка воды в магнитном поле. Магнитный метод водоподготовки основан на явлении того, что вода после воздействия на нее магнитного поля при последующем ее нагреве в котле не дает накипных отложений на поверхности

нагрева. Некоторые соединения кристаллизуются на поверхности нагрева, образуя накипь. Центрами накипеобразования являются шероховатости поверхности нагрева [135]. В результате магнитной обработки соли жесткости выпадают в виде шлама и должны непрерывно удаляться из нижних точек котла.

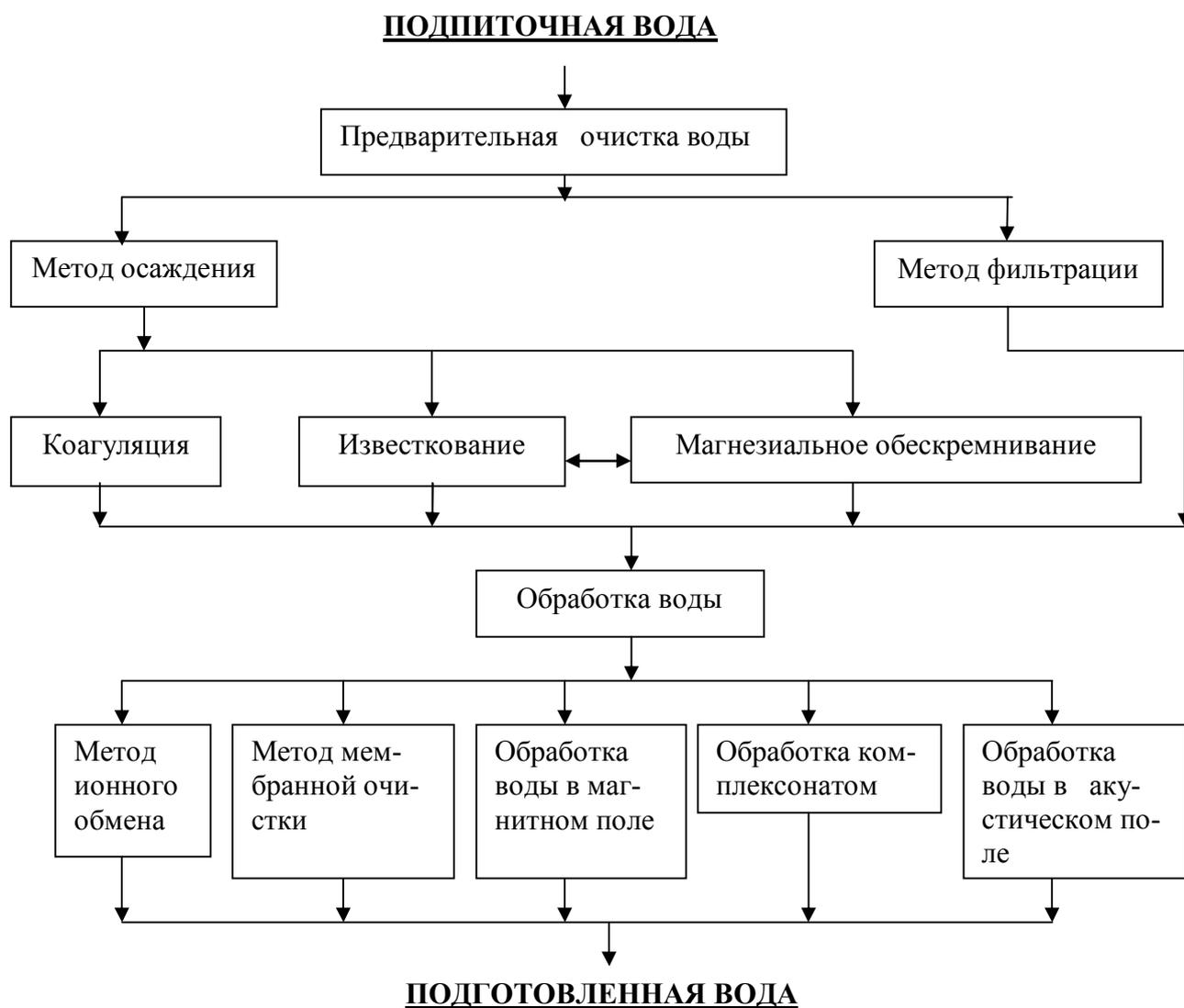


Рисунок 1.2 – Классификация способов водоподготовки

На рисунке 1.2 представлена классификация способов водоподготовки.

На рисунках 1.3, 1.4, 1.5 представлены гистограммы, которые позволяют оценить степень накипеобразования, коррозии и стоимости подготовки 1 м³ воды.

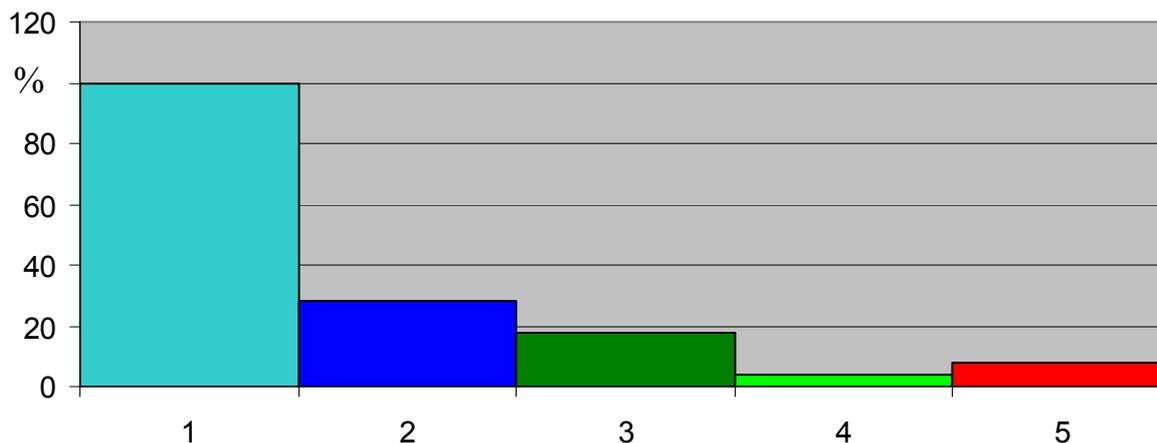


Рисунок 1.3 – Гистограмма накипеобразования относительно исходной воды: 1 – образование накипи при применении исходной воды; 2 – осаждение накипи при подготовке воды по схеме одноступенчатого Na- катионирования; 3 – накипь в результате обработки воды по схеме двухступенчатого Na- катионирования; 4 – выделение накипи при подготовке исходной воды комплексо- натами; 5 – наслоение накипи при магнитной обработке воды

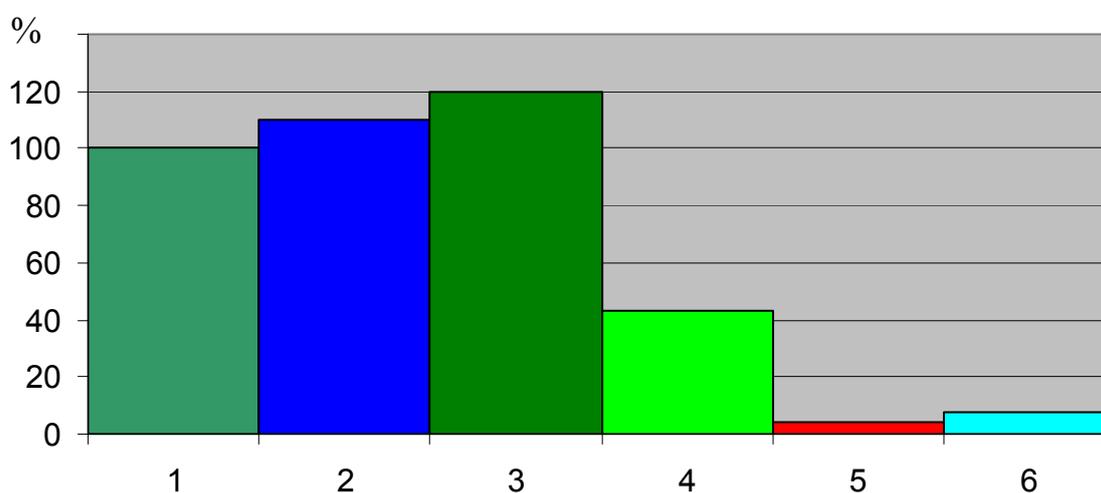


Рисунок 1.4 – Гистограмма коррозии относительно исходной воды: 1 – коррозия при использовании исходной воды; 2 – коррозия в результате подготовки воды по схеме одноступенчатого Na- катионирования; 3 – коррозия при подготовки воды по схеме двухступенчатого Na- катионирования; 4 – коррозия при подго- товке по схеме двухступенчатого Na- катионирования + деаэрация; 5 – коррозия при подготовке воды комплексо- натами; 6 – коррозия при магнитной подготовке воды

Подготовка 1 м³ воды с использованием Na- катионирования обхо- дится в настоящее время 17-21 руб., а обработка воды комплексо- натами стоит 2,03 руб. Себестоимость магнитной обработки 1 м³ воды не превы- шает 0,1 руб.

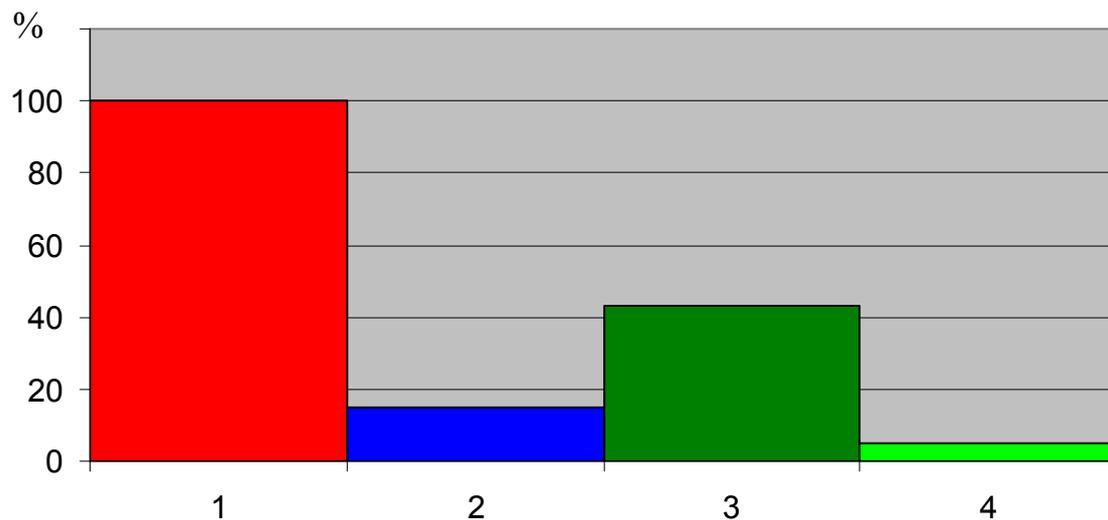


Рисунок 1.5 – Гистограмма стоимости подготовки 1м³ воды: 1 – двухступенчатое Na- катионирование; 2 – подготовка комплексонатом в водогрейных котельных; 3 – подготовка комплексонатом в паровых котельных; 4 – подготовка воды в котельных с магнитной обработкой

Статистическое исследование применения различных способов водоподготовки на котельных Ставропольского края и Карачаево-Черкесской Республики дало результаты, приведенные на рисунке 1.6.

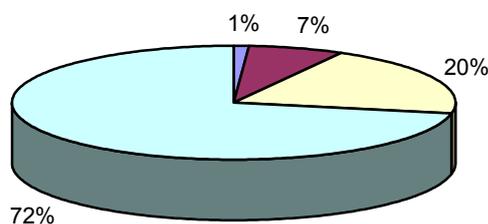


Рисунок 1.6 – Круговая диаграмма способов водоподготовки на котельных Ставропольского края и Карачаево-Черкесской Республики: 1% – ОЭДФ-Zn, 7% – магнитная водоподготовка, 20 % – химводоподготовка, 72% – без предварительной подготовки

1.2 ПРОЦЕСС ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОДУ

Накопленные научные знания не дают однозначного ответа на вопрос о влиянии магнитного поля на физико-химические процессы, происходящие в водных растворах. Однако, можно считать установленным, что магнитное поле оказывает определенное влияние на кинетику кристаллизации, вызывая увеличение концентрации центров кристаллизации в массе воды, вследствие чего вместо накипи образуется взвесь (шлам).

Процессы, протекающие в воде при наложении магнитного поля, можно представить следующим образом, при прохождении воды через зону обработки магнитным полем и наличии ферромагнетиков в пересыщенном по накипеобразователю растворе (воде), образуются зародыши центров кристаллизации.

Тебенихин Е.Ф. совместно с Кишневым В.А. провели детальное исследование механизма образования центров кристаллизации в присутствии окислов железа [135]. Эти окислы под воздействием магнитного поля в зоне обработки аппарата укрупняются до размера больше критического для данного пересыщения и адсорбируют избыток кристаллизующегося вещества (накипеобразователя), превращаясь в затравку. Понятием критический характеризуется размер частиц (около 0,5 мкм), выполняющих роль центров кристаллизации.

Центром кристаллизации может быть частица той же природы, что и накипеобразователь, любая другая изоморфная с последним частица.

Кристаллизация происходит значительно быстрее и легче, если в растворе уже существует твердая поверхность. По данным Р.Ф. Стринклер-Констэбл, выделение твердой фазы на готовой поверхности протекает значительно легче, так как энергия, необходимая для этого, меньше, чем для возникновения зародыша в объеме раствора. Поверхностью, на которой происходит кристаллизация, может служить не только кристалл данного вещества, но и любой другой предмет, на котором возможна адсорбция ионов или молекул, находящихся в растворе. Механизм процесса, в этом случае, может быть представлен следующим образом. Частицы вещества адсорбируют на своей поверхности молекулы или ионы кристаллизующегося вещества, в результате чего образуется адсорбционный слой. Этот слой постепенно уплотняется и превращается в слой кристаллического вещества. Дальнейший рост происходит за счет растворенного вещества, кристаллизующегося на поверхности частицы. Центром кристаллизации может служить частица размером несколько больше критического для данного пересыщения, состоящая из кристаллизующегося вещества, изоморфного ему, или любое другое образование, способное адсорбировать выделяющееся вещество. Частицы, выполняющие роль цен-

тров кристаллизации, обладают значительной суммарной поверхностью и ускоряют объемную кристаллизацию.

Примером влияния готовой поверхности на кристаллизацию может служить тот факт, что зародыши кристаллизации обычно образуются на поверхности нагрева или охлаждения теплоагрегата, так как энергия, затрачиваемая на образование кристаллов около твердой стенки, будет значительно меньше энергии, необходимой для выделения в объеме воды. При этом, на образование зародыша и кристаллизацию будут влиять также электрическое взаимодействие и характер поверхности (наличие шероховатости). Трещины являются факторами, увеличивающими поверхность. В их присутствии величина работы образования зародыша может быть настолько уменьшена, что выделение твердой фазы при определенных условиях может произойти даже из не пересыщенного раствора.

В природной воде, главным образом, находится карбонат кальция, значительно реже сульфат кальция и гидроокись магния.

Карбонат кальция в природе встречается в двух кристаллических модификациях – кальцита и арагонита. Кальцит кристаллизуется в форме ромбоэдров, удлиненных призм. Арагонит относится к ромбической системе и может приобретать различные формы.

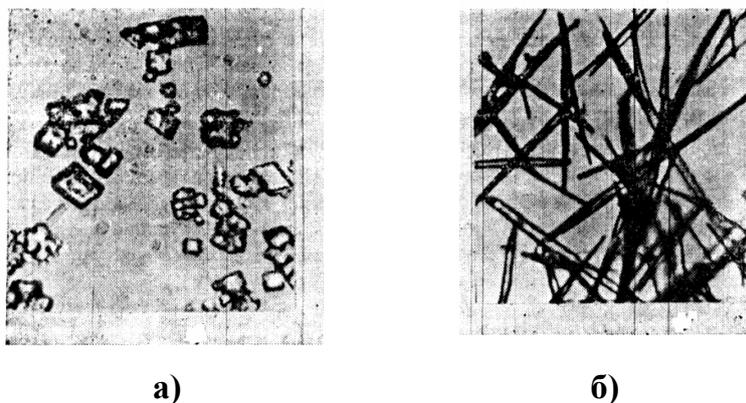


Рисунок 1.7 – Модификации карбоната кальция: а – кальцит; б – арагонит

Имеющиеся в литературе сведения противоречивы. Одни исследователи считают, что уменьшение накипи под влиянием магнитного поля связано с образованием, главным образом, стабильной формы карбоната кальция – кальцита. Другие полагают, что это явление вызвано выделением метастабильной модификации – арагонита.

Тебенихиным Е.Ф. [136] было проведено исследование влияния различных факторов на характер выделяющейся из воды твердой фазы. Им установлено, что из моно-раствора бикарбоната кальция при температуре, не превышающей 50 °С, выделяется кальцит, а при более высокой темпе-

ратуре - арагонит в иглообразной форме. При сравнительно медленной кристаллизации (до 50°C) твердая фаза кальцита успевает сформироваться. С повышением же температуры и, соответственно, увеличением скорости разложения бикарбоната кальция, образуется неустойчивая форма – арагонит. Процесс этот можно затормозить увеличением парциального давления.

Изучение наложения магнитного поля на выделяющуюся твердую фазу карбоната кальция из нестабильной среды (при $t=20^{\circ}\text{C}$ и $t=100^{\circ}\text{C}$) показало, что изменяются размер и количество кристаллов, но не характер фаз.

Магнитное поле влияет только на геометрический размер кристаллов. С увеличением напряженности магнитного поля твердая фаза становится мельче, а количество частиц (центров кристаллизации) возрастает, что показано на рисунке 1.8 и рисунке 1.9.

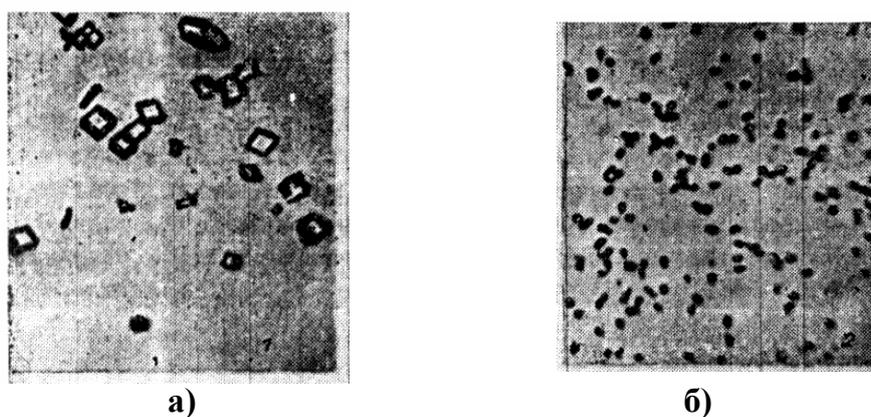


Рисунок 1.8 – Влияние магнитного поля на модификацию карбоната кальция – кальцит в водном растворе: а – до обработки магнитным полем; б – после магнитной обработки

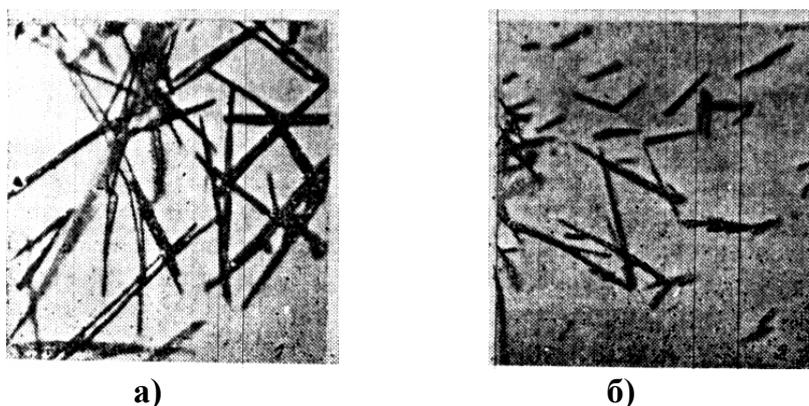


Рисунок 1.9 – Влияние магнитного поля на модификацию карбоната кальция – арагонит: а – до обработки магнитным полем; б – после магнитной обработки

В практике эксплуатации нагревательного оборудования, при использовании воды, обработанной магнитным полем, наблюдается явление, когда ранее образовавшаяся накипь становится хрупкой, растрескивается,

вспучивается и сравнительно легко отслаивается в виде корок, то есть нагревательный элемент самоочищается. Новая же накипь, если и образуется в незначительном количестве, то через некоторое время отстает. Обычно процесс становится заметным через месяц или два от начала применения магнитной обработки.

Отмеченное явление изучалось многими исследователями, которые по-разному объясняют процесс разрушения накипи. Так, в одних работах воде, обработанной магнитным полем, приписывается повышенная способность растворять карбонатную и смешанную накипь (Б. П. Татаринев, П. С. Стукалов, М. Ф. Скалозубов) [134]. Согласно другим (И. Ф. Домников), коллоидные частицы, образующиеся при обработке воды, проникают в поры накипи, ослабляют сцепление между кристалликами, что и приводит к локальным процессам эрозии, вследствие чего прочность накипи снижается и она отслаивается [148]. Разрушение накипи связано также с процессом дегидратации кристаллов под влиянием магнитного поля, в результате чего изменяется количество связанной в кристаллической решетке воды, нарушаются прочность решетки и монолитность накипи. В конечном итоге все это приводит к ее отслаиванию.

Анализируя все предлагаемые концепции, можно сделать вывод о том, что убедительнее всего выглядит следующий процесс, наблюдаемый на практике.

Под влиянием тепловых потоков и различного теплонапряжения отдельных участков, а так же разного модуля упругости накипи и стальной стенки нагревательного элемента в накипи образуются трещины. Проникающая в них вода испаряется и происходит отложение новой накипи. Таким образом, трещины зарастают. При магнитной обработке воды накипеобразователи выделяются не на поверхности нагрева или охлаждения, а в массе воды, вследствие чего «залечивания» трещин не происходит. Растрескивание увеличивается, прочность сцепления с металлом снижается и накипь отделяется в виде корок. Аналогичный эффект наблюдается при переходе питания котла с жесткой природной воды на мягкую или химически умягченную.

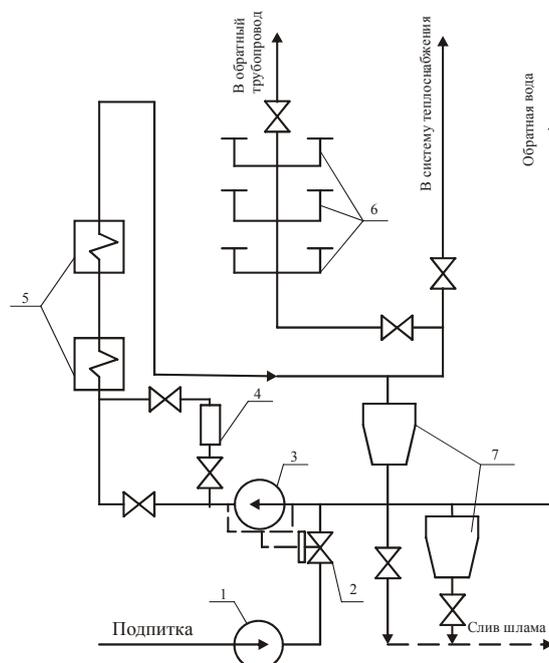
1.3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ВОДОПОДГОТОВКИ

В системах теплоснабжения при нагреве воды образуется накипь и шлам, которые состоят преимущественно, из карбоната кальция и продуктов коррозии стали. В водогрейном оборудовании и трубопроводах горячего водоснабжения образуются отложения оксида железа, количество которого увеличивается при отсутствии периодического удаления из теплоносителя коррозионно-активных газов, кислорода и углекислоты.

Применение магнитной обработки воды позволяет упростить технологические схемы водоподготовки.

Наличие разных видов теплотехнического оборудования обуславливает применение различных технологических схем водоподготовки.

При использовании в тепличных хозяйствах горячего водоснабжения применяется схема представленная на рисунке 1.10.



**Рисунок 1.10 – Технологическая схема открытой системы теплофикации:
1 – подпиточный насос; 2 – регулятор подпитки; 3 – сетевой насос; 4 – АМОВ;
5 – подогреватель; 6 – кран; 7 – шламоуловитель**

Производительность устройства подпитки в открытых системах теплоснабжения учитывает расход потребителями горячей воды, а так же расход из-за неплотностей системы. В некоторых системах подпитка водоподготовительной установки может достигать 40-50 % расхода циркулирующей воды.

Подготовка воды зависит от источника ее забора. Очень часто вода поступает из открытого водоема (озеро, река), тогда необходима очистка ее от грубодисперсных взвешенных частиц с последующей магнитной обработкой и термической деаэрацией. Воду целесообразнее обрабатывать до поступления ее в деаэратор и теплообменный аппарат. Перед включением аппарата котел необходимо очистить от накипи, а если очистка не возможна из-за остановки технологического процесса, то нужно установить режим частых продувок системы. Схема подготовки подпиточной воды представлена на рисунке 1.11.

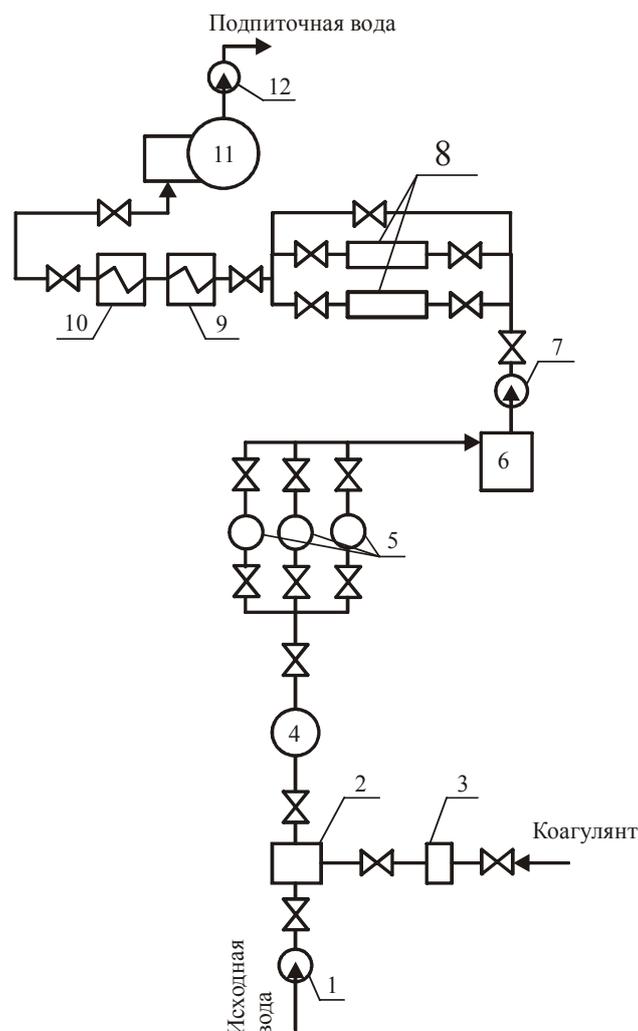


Рисунок 1.11 – Технологическая схема обработки подпиточной воды. 1 – нагнетательный насос; 2 – смеситель; 3 – дозатор коагулянта; 4 – воздухо- и грязеотделитель; 5 – осветлители КО-2; 6 – бак осветленной воды; 7 – насос осветленной воды; 8 – АМОВ; 9,10 – подогреватели воды; 11 – деаэратор; 12 – подпиточный насос

Та как нагретая вода поступает потребителям, то необходимо соблюдение требований ГОСТ 2874-73 «Питьевая вода» по следующим показателям: а) цветность; б) прозрачность.

Вода, которая прошла обработку в магнитном поле напряженностью до $16 \cdot 10^4$ А/м, может быть использована в бытовых целях.

Если для подпитки системы используется водопроводная вода, то схема подготовки значительно упрощается и представляет собой лишь обработку в магнитном поле и деаэрацию воды. На рисунке 1.12 представлена схема подготовки воды к огневым водогрейным котлам.

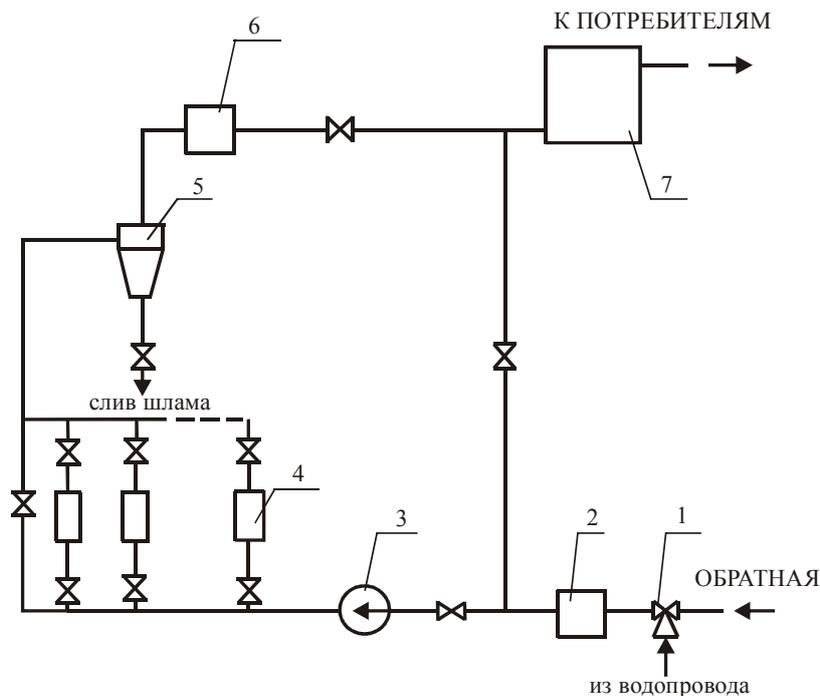


Рисунок 1.12 – Технологическая схема подключения противонакипных устройств и шламоотделителя к огневым водогрейным котлам: 1 – вентиль; 2 – входной водомер; 3 – насос; 4 – аппарат магнитной обработки воды; 5 – шламоотделитель; 6 – выходной водомер; 7 – водогрейный котел

Для того, чтобы получить полный эффект от обработки воды магнитным полем не достаточно лишь перевода накипеобразователей во взвешенное состояние, возможно скопление и прикипание данных частиц к твердым поверхностям и образование так называемой «вторичной» накипи. Поэтому, главным условием при обработке воды магнитным полем является своевременная очистка теплоносителя от отстающей накипи и образующегося шлама. Для соблюдения данного требования необходимо наличие в системе грязевиков – шламособорников и продувочных устройств, которые способны обеспечить непрерывное удаление образующегося шлама. Место их расположения зависит от конструктивных особенностей установки.

В огневых водогрейных котлах продувка не способна обеспечить своевременное удаление шлама. Для такой схемы целесообразнее использовать шламоуловитель в системе. Вода, которая проходит шламоуловитель, поступает обратно в котел, а шлам оседает и удаляется. Датчики расхода позволяют производить включения и отключения аппаратов в зависимости от расхода воды.

На рисунке 1.13 представлена технологическая схема включения аппарата магнитной обработки воды с электродным водогрейным котлом.

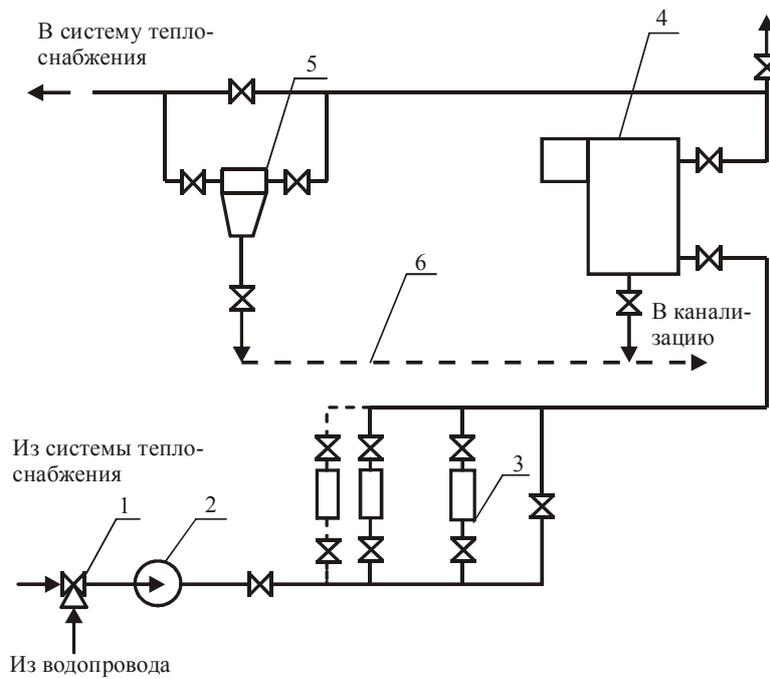


Рисунок 1.13 – Технологическая схема подключения АМОВ и шламоотделителя в теплосети с электродным водогрейным котлом: 1 – вентиль; 2 – насос; 3 – АМОВ; 4 – электродкотел; 5 – шламоотделитель; 6 – выход шлама при продувке

Увеличение количества пересечений магнитного поля водой позволяет увеличить эффект от обработки до 100 %. Это особенно важно, когда аппарат устанавливается в систему подпитки паровых котлов. Схема подключения АМОВ к паровым котлам представлена на рисунке 1.14.

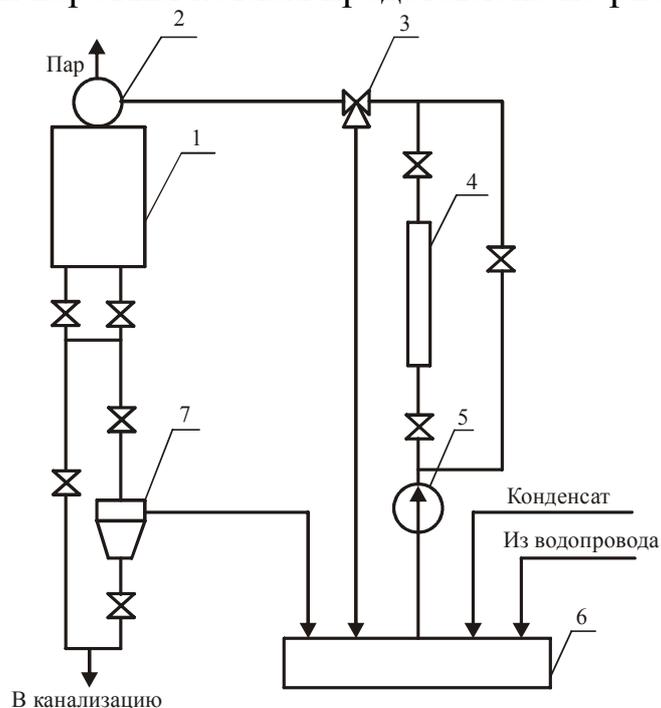


Рисунок 1.14 – Технологическая схема подключения АМОВ и шламоотделителя к паровому котлу: 1 – котел; 2 – паросборник котла; 3 – переключающий вентиль; 4 – АМОВ; 5 – питательный насос; 6 – емкость для питательной воды; 7 – шламоотделитель

Представление об эффективности работы аппарата можно получить по качеству продувочной воды. Если вода прозрачна, без шлама и мути – это может говорить о недостаточном или полном отсутствии воздействия магнитного поля. Мутность воды указывает нам на активное влияние магнитного поля.

Во время эксплуатации аппарата в местах обработки возможны скопления ферромагнитных окислов железа, наличие которых снижает эффект от обработки. В этом случае необходимо отключать аппарат от сети. Данная операция позволяет смыть скопившиеся частицы потоком воды.

Аппараты, используемые в настоящее время, рекомендуется располагать вертикально, во избежание возникновения воздушных пробок.

1.4 АППАРАТЫ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Изменение физико-химических свойств воды после магнитной обработки вызвало большой практический интерес к ее использованию, а неоднозначность теоретических основ процесса омагничивания обусловило, появление различных вариантов конструкций аппаратов. В настоящее время известно более 100 типов устройств для магнитной обработки веществ, однако, большинство из них имеют ряд существенных недостатков, что и ограничивает их широкое применение в сельском хозяйстве.

Аппараты для магнитной обработки воды подразделяются на 2 основные группы [137]: а) аппараты с постоянными магнитами; б) аппараты с электромагнитами (на постоянном и переменном токе).

Независимо от типа, для всех аппаратов характерно одно общее свойство - обрабатываемая жидкость должна находиться в движении.

В зависимости от конструкции аппарата направление силовых линий по отношению движущейся воды может быть различно. Исходя из этого, аппараты подразделяют на униполярные, в которых направление силовых линий, пересекающих поток воды во всем аппарате, сохраняется постоянным, биполярным в которых направление меняется дважды, и полиполярные, в которых направление изменяется многократно.

Конструкции аппаратов для магнитной обработки воды различны и зависят, от назначения, производительности, способа получения магнитного поля, количества активных зон и своеобразия технических решений.

На рисунке 1.15 представлена классификация аппаратов магнитной обработки воды.

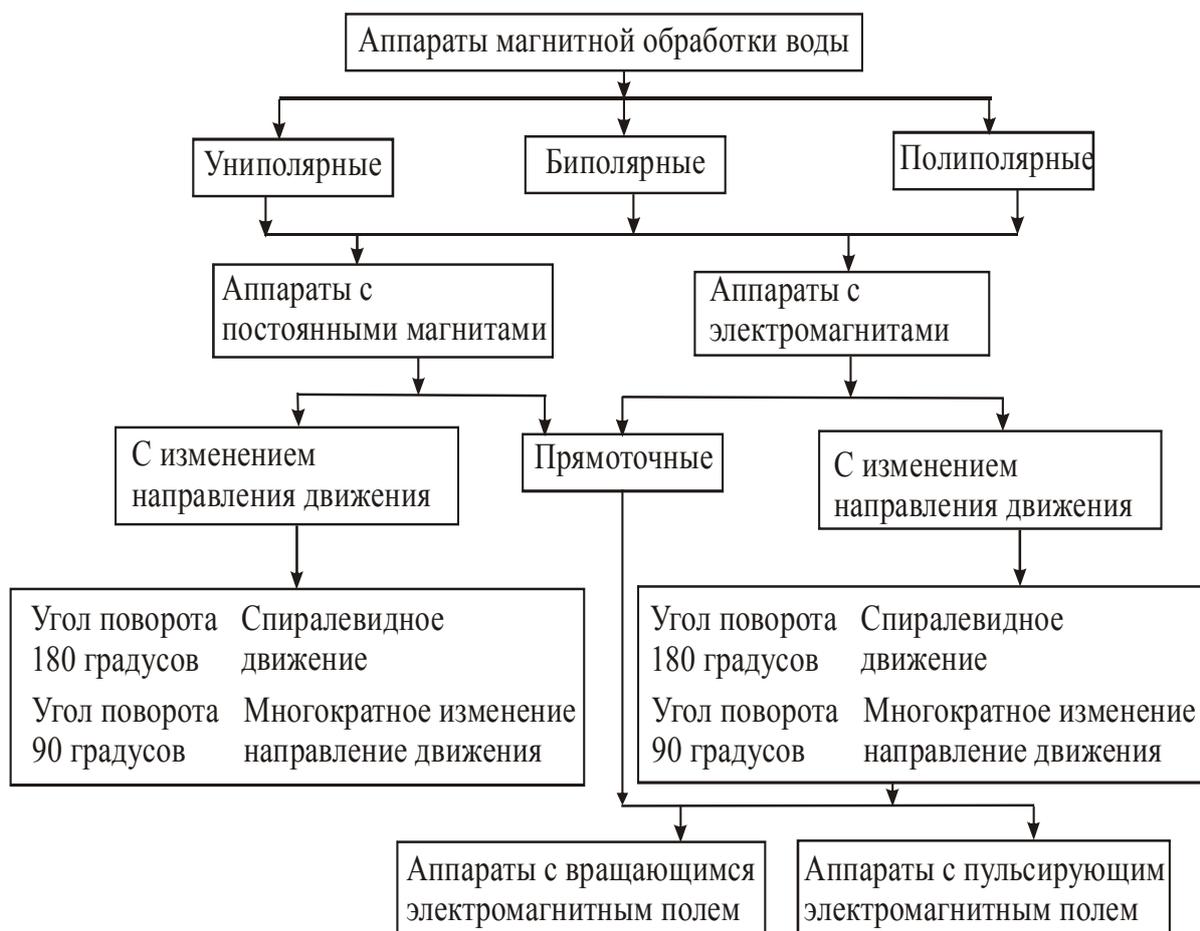


Рисунок 1.15 – Классификация аппаратов магнитной обработки воды

1.4.1 Аппараты магнитной обработки воды с постоянными магнитами

Аппараты с постоянными магнитами имеют определенные преимущества и недостатки. К преимуществам относятся сравнительная простота конструкции, отсутствие источника питания, элементов коммутации и защиты, электропроводки, возможность использования в агрессивных и взрывоопасных условиях работы. Основным недостатком данных разработок является отсутствие оперативного регулирования напряженности магнитного поля.

Ширина петли гистерезиса, и коэрцитивная сила постоянных магнитов зависят от их состава. Для аппаратов магнитной обработки применяют магниты из различных магнитомягких сплавов – ферритобаревые (марки ЗБА), ЮНДК-24 и др. Себестоимость этих материалов и их технические характеристики серьезно сказываются на массогабаритных показателях и производительности аппаратов.

В настоящее время известно более ста конструкций аппаратов для магнитной обработки водных сред, разработанных в нашей стране.

На рисунке 2.1 представлена схема аппарата магнитной обработки жидкости (автор изобретения Г.Г. Клещевников) [50].

Кольцевой трубопровод 1 прямоугольного сечения снаружи подсоединен по касательной, к входному патрубку 2 с вентилям 3 регулирования скорости жидкости и к емкости 4 выходного патрубка 5 слива обработанной жидкости. Внутри кольцевого трубопровода 1 размещено рабочее колесо, состоящее из цилиндрической втулки 6 с жестко закрепленными на ней (или выполненное как единое целое) лопатками 7. Рабочая часть кольцевого трубопровода 1 охватывается магнитами 8. Кольцевой трубопровод и рабочее колесо изготавливаются из диамагнитного материала.

Аппарат работает следующим образом.

При открытии вентиля 3, регулирующего скорость движения, жидкость по трубопроводу 1 падает на лопатки 7, приводит во вращение рабочее колесо, выбрасывается в свободное пространство емкости 4 и через патрубок 5 выходит из аппарата. Вместе с рабочим колесом с такой же скоростью будет перемещаться фиксированными объемами и жидкостью, которая при перемещении через магнитное поле, создаваемое магнитами 8, подвергается магнитной обработке. Выбором величин объемов, ограничиваемых поверхностями рабочего колеса и кольцевого трубопровода 1, скорость движения жидкости внутри каждого объема и разность скоростей, определяемую различием величин наружного и внутреннего диаметров трубопровода 1, можно сделать сколь угодно малой в сравнении со скоростью самого объема жидкости.

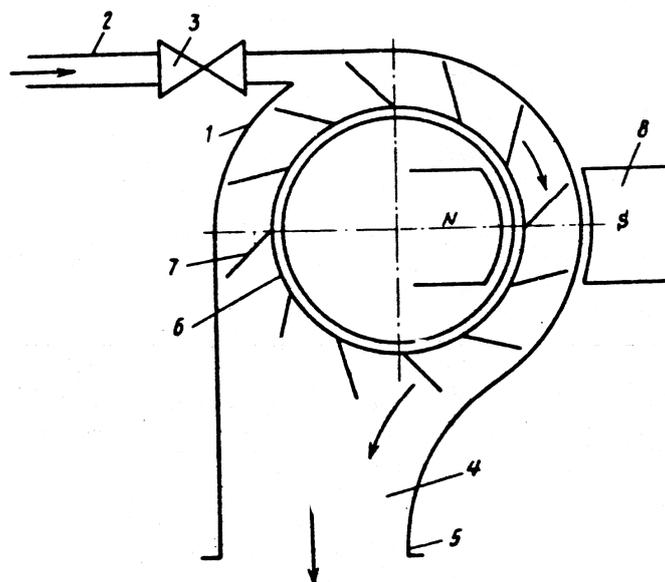


Рисунок 2.1 – Аппарат магнитной обработки жидкости Г.Г. Клещевникова:
1 – кольцевой трубопровод; 2 – входной патрубок; 3 – вентиль; 4 – емкость;
5 – выходной патрубок; 6 – втулка; 7 – лопатка; 8 – магнит

АМОЖ В.М. Бухолдина, В.Г. Зерницкого, В.И. Классена,
В.А. Мацеевского, Н.Е. Пичугина, Ю.Т. Попова, Г.Ф. Тагина и
Г.И. Яковченко [14]

На рисунке 2.2 изображено рассматриваемое устройство, вертикальный разрез; на рисунке 2.3 - разрез А-А.

Устройство для магнитной обработки жидкости состоит из корпуса 1, выполненного из диамагнитного материала, с крышкой 2, входным 3 и выходным 4 патрубками. Внутри корпуса установлены магнитные шайбы 5, насаженные на изготовленную из диамагнитного материала ступенчатую ось 6. Магнитные шайбы имеют по две пары разноименных полюсов. Зазор между дисковыми магнитными шайбами может быть обеспечен также установкой на гладкую ось втулки. К одной из шайб прижат укрепленный на оси внутренний магнитопровод 7, а на наружных торцах шайб установлены внешние дисковые магнитопроводы 8. Внутренний магнитопровод может быть выполнен в виде трехгранной призмы с закругленными краями двух граней. Такая конструкция магнитопровода обеспечивает плавное сужение потока обрабатываемой жидкости для получения необходимой оптимальной скорости потока и увеличение напряженности магнитного поля на участке максимальной скорости жидкости.

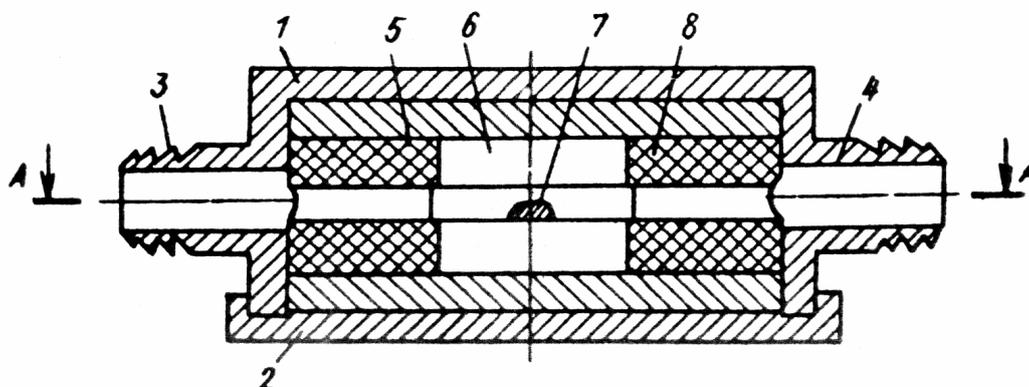


Рисунок 2.2 – Аппарат магнитной обработки жидкости В.М. Бухолдина, В.Г. Зерницкого, В.И. Классена, В.А. Мацеевского, Н.Е. Пичугина, Ю.Т. Попова, Г.Ф. Тагина и Г.И. Яковченко: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – входной патрубок; 4 – выходной патрубок; 5 – магнитная шайба; 6 – ступенчатая ось; 7 – внутренний магнитопровод; 8 – внешний магнитопровод

Устройство работает следующим образом.

Жидкость, предназначенная для магнитной обработки, поступает через патрубок 3 в зазор между магнитными шайбами 5 и по каналу, образованному наружными стенками шайб 5, внутренней стенкой корпуса 1 и осью 6, движется по криволинейной траектории к патрубку 4 для выхода жидкости. Благодаря тому, что каждая шайба имеет по две пары разно-

именных полюсов, магнитные силовые линии пересекают обрабатываемую жидкость то в одном, то в другом направлении, как в трех полюсном аппарате для магнитной обработки. В районе магнитопровода 7 благодаря сужению канала скорость движения жидкости увеличивается. В этом же месте, благодаря уменьшению зазора, жидкость пересекает магнитное поле более высокой напряженности. Градиент напряженности магнитного поля в устройстве увеличен, так как изменения направления силовых линий осуществляются по длине, не превышающей 1-2 мм.

Конструкция предлагаемого устройства позволяет повысить эффективность магнитной обработки за счет чередования полярности и движения обрабатываемой жидкости по криволинейной траектории.

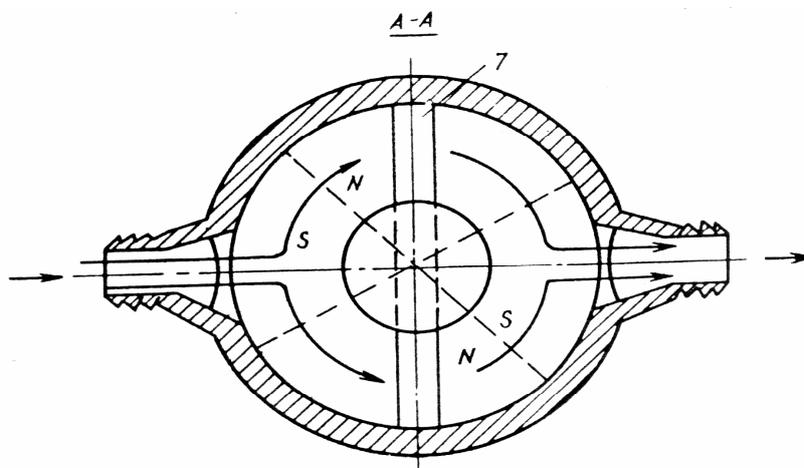


Рисунок 2.3 – Разрез АМОЖ В.М. Бухолдина, В.Г. Зерницкого, В.И. Классена, В.А. Мацеевского, Н.Е. Пичугина, Ю.Т. Попова, Г.Ф. Тагина и Г.И. Яковченко

АМОВ И.А. Шугианова, Н.П. Яковлева и П.Д. Еремеева (Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации) [19]

На рисунке 2.4 показан аппарат для магнитной обработки воды, на рисунке 2.5 - разрез А-А.

Аппарат состоит из магнитного статора 1, немагнитного ротора 2 и впрессованного в них одинакового на статоре и роторе числа стержневых постоянных магнитов 3. Магниты на статоре и роторе располагаются так, чтобы каждому магниту ротора соответствовал магнит статора, причем противоположащие магниты располагаются разноименными полюсами один к другому и выступают над образующими на величину 0,3-0,4 величины зазора между образующими ротора и статора.

Максимальная величина напряженности магнитного поля и давление имеют место при минимальном зазоре между полюсами ротора и статора, однако, производительность аппарата от этого уменьшится, а затраты ме-

ханической энергии на вращение ротора возрастут. Поэтому, для обеспечения пульсирующих градиентов давления в рабочем зазоре полюса ротора и статора выполнены выступающими, а для уменьшения механического сопротивления обрабатываемой жидкости полюса выступают над поверхностями ротора и статора на высоту 0,3-0,4 величины между образующей ротора и статора, так как, если эта величина окажется равной 0,5 зазор между полюсами ротора и статора обратится в нуль, а если менее 0,3 то эффективность обработки уменьшится вследствие уменьшения в рабочем зазоре градиентов давления и напряженности.

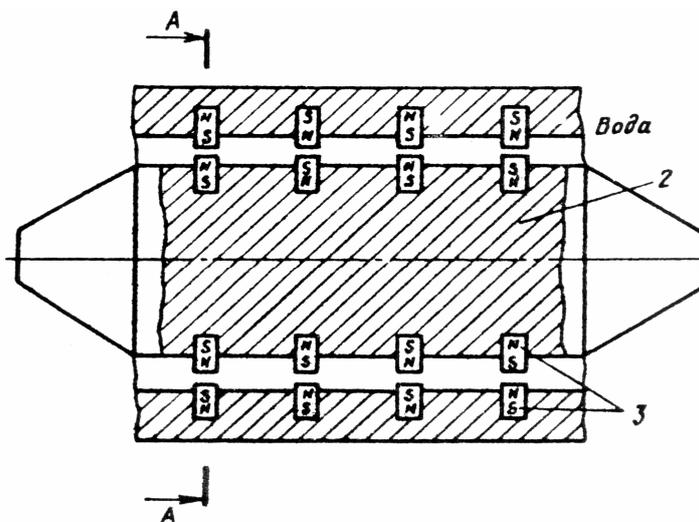
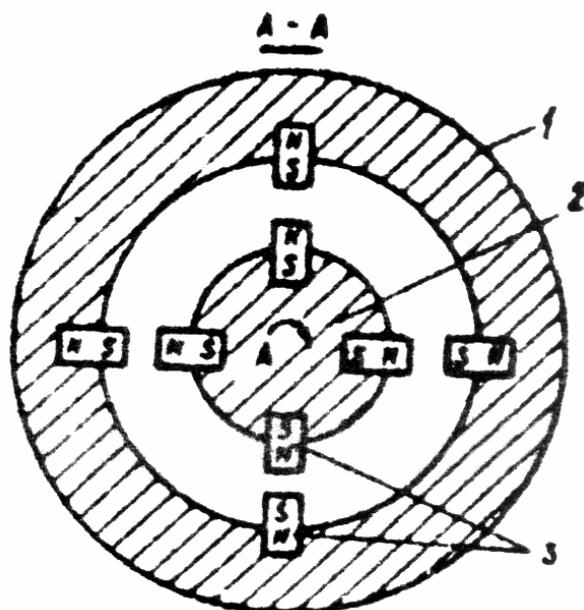


Рисунок 2.4 – Аппарат для магнитной обработки воды И.А. Шугипанова, Н.П. Яковлева и П.Д. Еремеева

Аппарат работает следующим образом.

При вращении ротора 2 относительно статора 1, напряженность магнитного поля в зоне обработки воды непрерывно изменяется, вследствие изменения расстояния между магнитными полюсами, достигая максимума в момент противостояния полюсов.

Таким образом, высокие градиенты магнитного поля в жидкости здесь получают за счет механического движения магнитов один относительно другого, а не за счет движения жидкости относительно полюсов. Кроме того, в момент максимума магнитного поля зазоры между магнитами достигают минимума в зоне обработки, где в соответствии, с законами гидродинамики возникает резкий перепад давления в обрабатываемой воде, что значительно увеличивает эффективность магнитной обработки.



**Рисунок 2.5 – Разрез АМОВ И.А. Шугипанова, Н.П. Яковлева и П.Д. Еремеева:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – постоянный магнит**

Аппарат для магнитной обработки водных систем В.Г. Зерницкого, В.М. Бухолдина, О.Б. Киселева, Н.Е. Пичугина, А.Г. Долматова, Н.П. Морозова, В.И. Мудрова и Р.М. Абдрахимова [38]

На рисунке 2.6 а) изображен предлагаемый аппарат, продольный разрез; б) то же, при смещении центральных магнитодержателей; в) то же, вид сверху.

Аппарат состоит из корпуса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками. Внутри корпуса 1 на верхней и нижней стенках установлены неподвижные магнитные системы, состоящие из постоянных ферритобариевых магнитов 4 и фасонных магнитопроводов 5. В середине корпуса перпендикулярно его осевой линии установлены с возможностью вращения вокруг оси полый вал 6 и внутри его вал 7, на которых закреплены изготовленные из диамагнитных материалов магнитодержатели 8, на поверхности которых, обращенной к осям каналов, закреплены (например, с помощью клея) центральные постоянные ферритобариевые магниты 9 и клиновидные магнитопроводы 10. Полый вал 6 и вал 7 через сальниковые уплотнения 11 выходят из корпуса 1. На концах полого вала 6 и вала 7 закреплены рычаги 12, на которых с возможностью перемещения установлены регулировочные грузы 13, положение которых фиксируется болтами 14. На наружных сторонах боковых стенок корпуса 1 закреплены планки 15 с отверстиями, в которые устанавливаются болты 16 для установки минимальной высоты каналов, по которым движется обрабатываемая водная система.

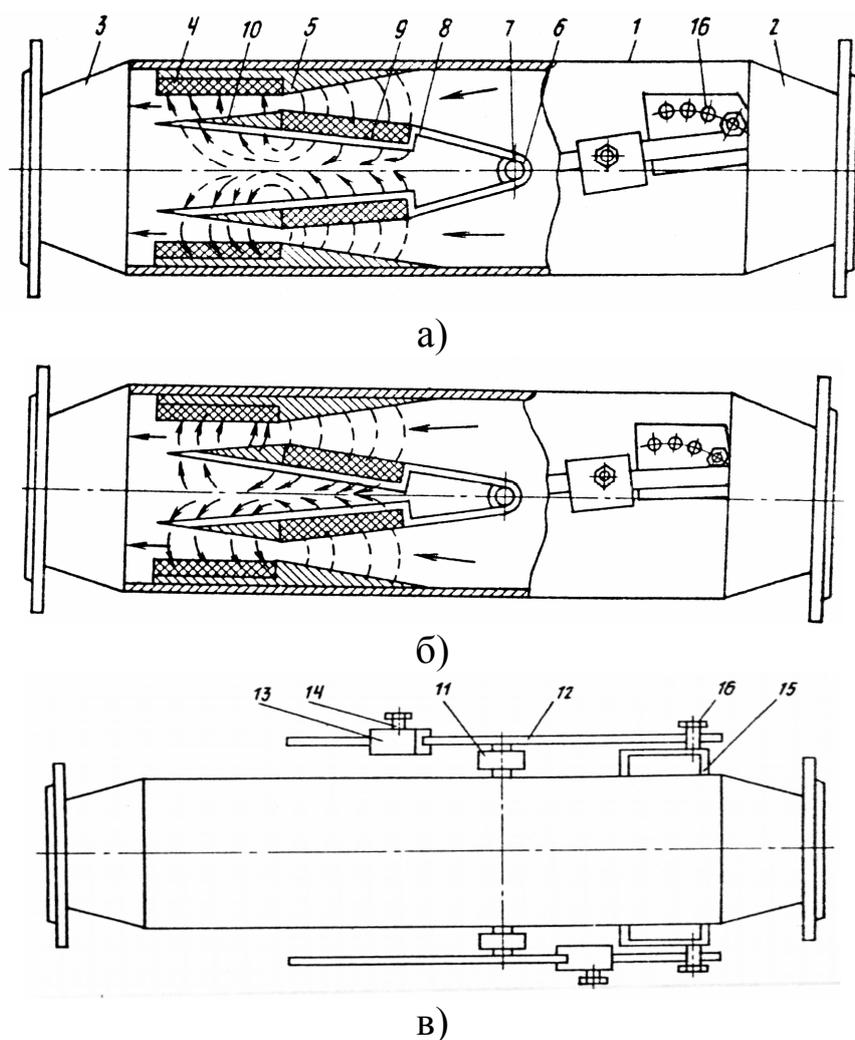


Рисунок 2.6 – Аппарат для магнитной обработки водных систем В.Г. Зерницкого и др.: 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – постоянный ферритобариевый магнит; 5 – фасонный магнитопровод; 6 – полый вал; 7 – вал; 8 – магнитодержатель; 9 – центральный ферритобариевый магнит; 10 – клиновидный магнитопровод; 11 – сальниковое уплотнение; 12 – рычаг; 13 – регулировочный груз; 14 – болт; 15 – планка с отверстиями; 16 – болт

Магниты 4 и 9 ориентированы к осям каналов одинаковыми полюсами и смещены относительно друг друга так, что их торцовые стенки находятся в одной плоскости, перпендикулярной оси корпуса. Центральные постоянные магниты 9 ориентированы к оси аппарата одноименными полюсами.

Аппарат работает следующим образом. Обрабатываемая водная система через входной патрубок 2 поступает в корпус 1 и движется по суживающимся по высоте каналам, образованным неподвижными магнитными системами и диамагнитными магнитодержателями с постоянными магнитами 9, пересекая магнитные поля, образованные постоянными магнитами 4 и 9 и магнитопроводами 5 и 10. При движении в каналах скорость водной системы и напряженность магнитного поля увеличиваются, достигая

максимума на участках с минимальной высотой. В самом узком месте каналов направление магнитного поля резко меняется на противоположное, в результате чего магнитная обработка осуществляется при высоком градиенте напряженности магнитного поля. Далее скорость движения водной системы уменьшается.

При попадании в каналы крупных (негабаритных) частиц магнитодержателя 8 с постоянными магнитами 9 и клиновидными магнитопроводами смещаются к оси аппарата, в результате чего сечение каналов увеличивается (рисунок 2.6 б), крупные частицы проходят через каналы и выходят из аппарата, а магнитодержатели возвращаются в рабочее положение (рисунок 2.6 а).

Смещая регулировочные грузы 13 на рычагах 12, можно регулировать величину силы необходимой для смещения магнитодержателей 8, т.е. напор обрабатываемой водной системы, при котором начинается смещение магнитодержателей 8.

С помощью болтов 16 без разборки аппарата в нем можно изменять высоту каналов и устанавливать, таким образом, необходимую оптимальную скорость потока.

Устройство магнитной обработки газообразных и жидких сред В.А. Радионова [41] изображено на рисунке 2.7 а), продольный разрез; б) то же, поперечный разрез.

Устройство магнитной обработки газообразных и жидких сред состоит из плоских постоянных магнитов 1 с магнитопроводом 2, выполненным в виде двух насадок 3 и 4, имеющих U-образную форму и в состыкованном состоянии представляет собой эллипс с удлиненной большой осью (рисунок 2.7 б). Стык 5 располагается строго по центру постоянных магнитов, т.е. в месте наименьшей напряженности магнитного потока. Магнитная система, включающая постоянные магниты и насадки, охватывается обечайками 6 и 7, выполненными из магнитного материала и жестко состыкованными между собой, например, при помощи завальцовки. Таким образом, обечайки являются дополнительным магнитопроводом, а также образуют общий корпус устройства. Это способствует снижению массогабаритных характеристик с обеспечением максимальной индукции в рабочем зазоре 8 устройства.

Для обеспечения максимальной индукции в зазоре, необходима минимальная толщина магнитопровода по всему контуру 4 мм при магнитной индукции на поверхности магнитов 0,14 Тл. В предлагаемом устройстве насадки 4 и 5 выполняются из материала толщиной 2,5 мм, а обечайки 7 и 8 – толщиной 0,8 мм. При этом магнитная индукция в зазоре сохраняется без изменения, а масса устройства снижается на 40 %.

На поверхности обечаек 6 и 7 выполнены две параллельные гофры 9, между которыми установлены постоянные магниты. В противоположном направлении магниты зафиксированы вкладышами 10 с выступом 11, который и фиксирует рабочий зазор между постоянными магнитами.

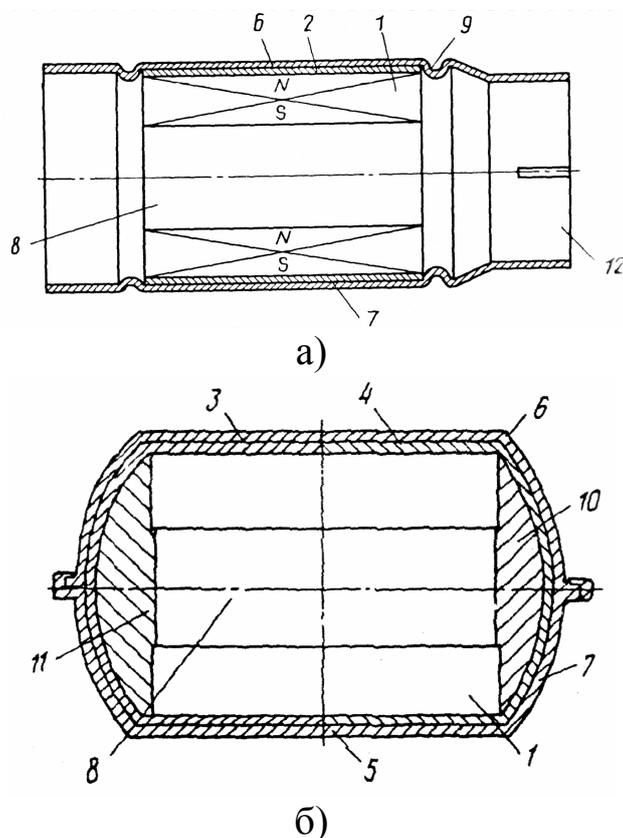


Рисунок 2.7 – Устройство магнитной обработки газообразных и жидких сред
В.А. Радионова и др.: 1 – постоянные магниты; 2 – манитопровод; 3,4 – насадки;
5 – стык; 6,7 – обечайки; 8 – рабочий зазор; 9 – гофра; 10 – вкладыш;
11 – выступ; 12 – входной патрубок

Устройство работает следующим образом.

Жидкая или газообразная среда, предназначенная для магнитной обработки, через входной патрубок 12 попадает в зазор между постоянными магнитами 1, ориентированными относительно друг друга разноименными полюсами. Движущаяся между постоянными магнитами среда омагничивается и поступает к потребителю. В районе постоянных магнитов сечение для прохождения имеет форму четырехугольника в отличие от круглого сечения в проводящем трубопроводе и входном патрубке. В связи с изменением формы сечения изменяется и форма потока, и его скорость при пересечении магнитных силовых линий максимальной напряженности.

Устройства магнитной обработки воды МПВ MWS предназначены для обработки воды в потоке постоянным магнитным полем для предот-

вращения образования и ликвидации уже отложившейся накипи на стенках трубопроводов и теплообменных элементов.

Устройства магнитной обработки воды МПВ MWS применяются:

-для снижения эффекта накипеобразования в трубопроводах горячего и холодного водоснабжения общехозяйственного, технического и бытового назначения, нагревательных элементах котельного оборудования, теплообменниках, парогенераторах, охлаждающем оборудовании и т.п.;

-для предотвращения очаговой коррозии в трубопроводах горячего и холодного водоснабжения общехозяйственного, технического и бытового назначения;

-для увеличения фильтроцикла систем химической водоподготовки;

-при использовании воды из подземных источников и систем централизованного и нецентрализованного водоснабжения.

Устройство может использоваться самостоятельно или как составная часть систем подготовки воды в жилых помещениях, постройках, детских и лечебно-профилактических учреждениях, для водоподготовки в пищевой промышленности и т.п. Устройства МПВ MWS могут быть включены в состав любых установок, подверженных накипеобразованию в процессе эксплуатации. В результате магнитной обработки воды вместо котельного камня образуется мелкокристаллический легко удаляемый шлам.

Метод магнитной обработки воды не требует подключения к электрической сети и применения каких-либо химических реактивов и поэтому является абсолютно экологически чистым.

Основным элементом устройства является многополюсный магнитный элемент цилиндрической формы. Магнитный элемент соосно установлен в корпусе, представляющем собой стандартную трубу из ферромагнитного материала, и составляет с нею единую магнитную систему. За счет имеющегося в данной системе магнитного поля достигается максимальная эффективность воздействия на воду. Вода, проходя через определенным образом выровненное магнитное поле, создаваемое в устройстве постоянными магнитами, претерпевает физические изменения. Примеси, находящиеся в воде, становятся центрами кристаллизации, то есть точками для осаждения молекул кальция (Ca), тем самым давая им возможность нарастать в потоке воды друг на друга, а не соединяться с окружающими и нагреваемыми поверхностями. Эти новообразования кристаллической структуры предотвращают выпадение накипи на внутренней поверхности труб, что является основной первопричиной лавинообразного известкового их обрастания. Микрочастицы свободно циркулируют по трубопроводам, давая возможность свободным частицам кальция соединяться с ними, а не друг с другом. Они также способствуют тому, что существующий известковый налет становится рыхлым, разбивается на от-

дельные фрагменты и вымывается из системы вместе с водой в виде суспензии.

Магнитный преобразователь воды МПВ «Магниполь» - это устройство для магнитной обработки воды, уменьшающее оседание накипи на стенках труб и теплообменных элементов, а так же ликвидирующее уже отложившуюся накипь (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Магнитный преобразователь воды, внешний вид

Устройства МПВ «Магниполь» применяются там, где есть проблемы с накипью: жилые квартиры, коттеджи, котельные, крупные промышленные предприятия, электростанции и пр. Устройство «Магниполь» - это преобразователь воды, предназначенный для магнитной обработки воды в потоке постоянным магнитным полем. МПВ «Магниполь» - представляет собой сложную магнитную систему, собранную с использованием высокоэнергетических постоянных магнитов. Направление силовых полей полиградиентно и сфокусировано перпендикулярно потоку воды, что выгодно отличает данный прибор от аналогичного оборудования.

Метод магнитной обработки воды известен давно, но только разработка магнитов нового поколения с высокими техническими характеристиками вызвала настоящий бум в развитых странах. Предприятия Европы отказываются от химических методов умягчения воды, делая выбор в пользу более дешевого и экологически чистого метода.

Бытовая серия:

МПВ Ду15 - Ду25 - с резьбовыми разъемными соединениями;

МПВ Ду32 - Ду50 - с резьбовыми неразъемными соединениями.

Промышленная серия:

МПВ Ду15 - Ду50 - с резьбовыми неразъемными соединениями;

МПВ Ду65 - Ду325 - с фланцевыми соединениями.

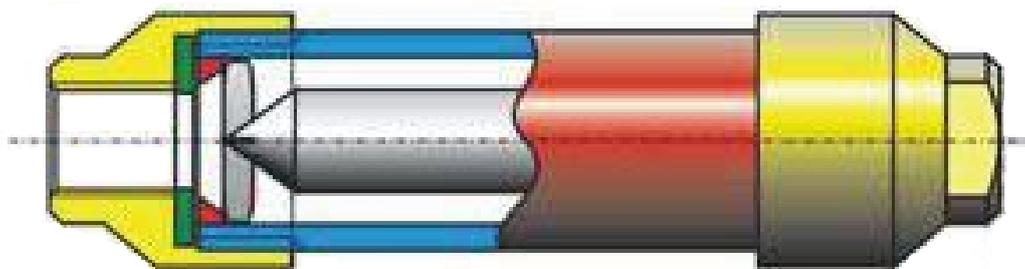


Рисунок 2.9 – Магнитный преобразователь воды

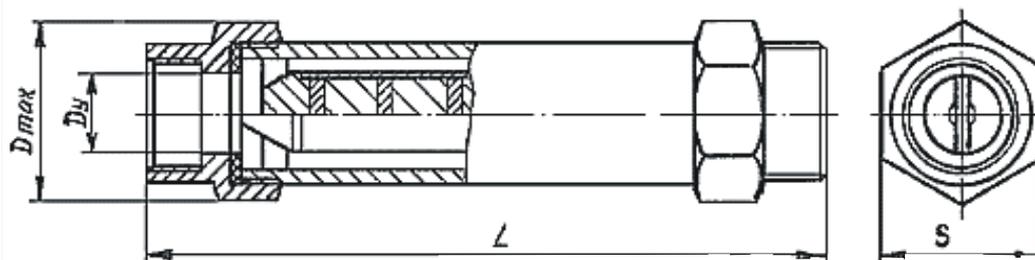


Рисунок 2.10 – Магнитный преобразователь воды, схема

Технические данные магнитного преобразователя воды: тип соединения – резьбовой; материал уплотнения соединений - резина, паронит; материал корпуса - нержавеющая сталь; материал магнитной системы - железо-неодим-бор (Fe-Nd-B).

Условия по монтажу и эксплуатации: установка системы: горизонтальная или вертикальная; направление потока жидкой среды: реверсивное; температура эксплуатации: до + 95 °С; рабочее давление: до 10 атм (кг/см²)

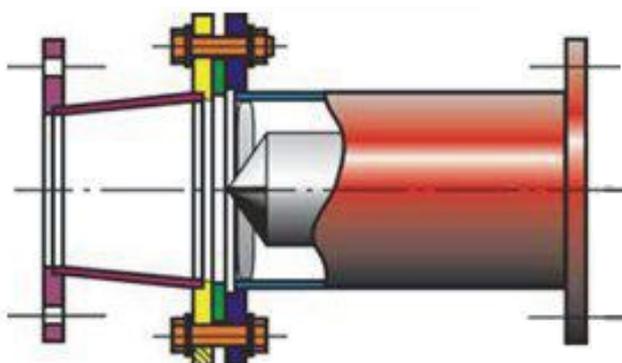


Рисунок 2.11 – Магнитный преобразователь воды с фланцевыми соединениями

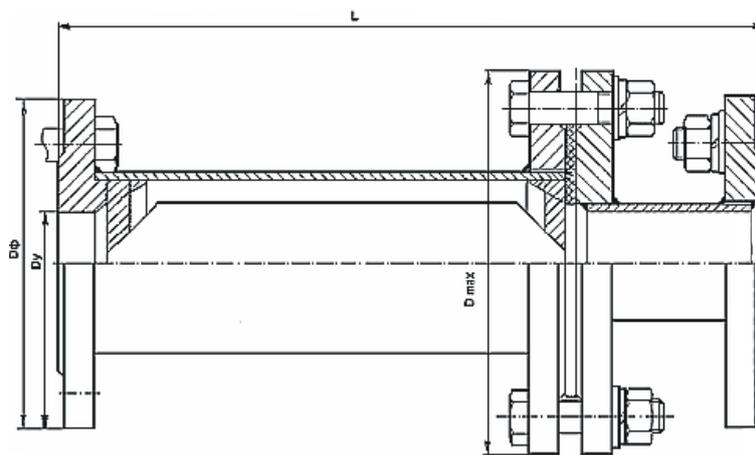


Рисунок 2.12 – Магнитный преобразователь воды с фланцевыми соединениями, схема

Технические данные магнитного преобразователя воды с фланцевыми соединениями: тип соединения – фланцевый; материал уплотнения соединений – паронит; материал корпуса - конструкционная сталь; материал магнитной системы - железо-неодим-бор (Fe-Nd-B).

Условия по монтажу и эксплуатации; установка системы: горизонтальная или вертикальная; направление потока жидкой среды: реверсивное; температура эксплуатации: до + 95 °С; рабочее давление: до 10 атм (кг/см²)

1.4.2 Аппараты магнитной обработки воды с электромагнитами

Более широкими возможностями обладают аппараты, в которых магнитное поле создается электромагнитами постоянного или переменного тока. Аппараты на переменном токе проще в эксплуатации, так как для их питания используется сетевой ток и, кроме того, в них не происходит накопление ферромагнитных окислов железа, нарушающих нормальную работу аппарата. Однако, они требуют особо тщательного расчета во избежание перегрева.

Устройство для магнитной обработки жидкостей. Авторы Лазарев В.Н., Джунь В.А., Эриванцев И.Н. [51].

На рисунке 2.13 а) изображено устройство для магнитной обработки жидкостей, общий вид; б) – то же, вид сбоку; в) – немагнитная вставка с зигзагообразным каналом для жидкости, разрез; г) – разрез А-А.

Устройство для магнитной обработки жидкостей содержит магнитопровод 1, выполненный из набора тонких пластин электротехнической стали. На магнитопроводе помещена намагничивающая катушка 2. В межполюсном пространстве магнитопровода помещена вставка 3, изго-

товленная из немагнитного материала, которая снабжена подводющим 4 и отводящим 5 штуцерами. Вставка 3 имеет канал 6 для пропуска жидкости, который образован с помощью перегородок 7. Поперечное сечение канала 6 прямоугольной формы, у которого отношение сторон имеет значительную величину. Катушка 2 устройства подключается к источнику электрической энергии постоянного или переменного тока регулируемой частоты.

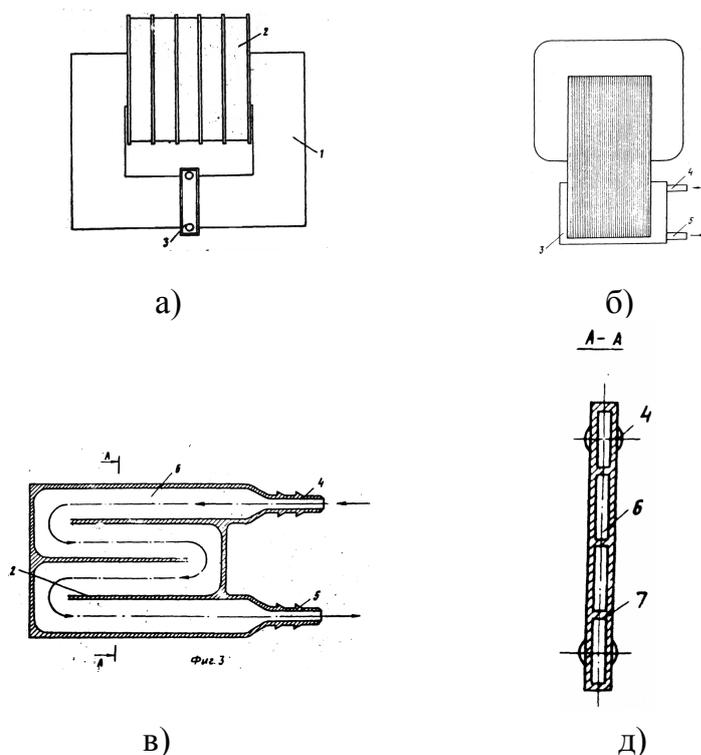


Рисунок 2.13 – Устройство для магнитной обработки жидкости Лазарева В.Н., Джунь В.А., Эриванцева И.Н.: 1 – магнитопровод; 2 – намагничивающая катушка; 3 – вставка; 4 – подводящий штуцер; 5 – отводящий штуцер; 6 – канал для прохода жидкости; 7 – перегородка

Устройство работает следующим образом.

При протекании тока по катушке 2, в ней создается магнитное поле, которое, замыкаясь по магнитопроводу 1, пересекает вставку 3 из немагнитного материала, по которой через канал 6 проходит жидкость.

Таким образом, жидкость, находясь в магнитном поле, подвергается магнитной обработке. Так как канал выполнен по зигзагу, расположенному в межполюсном пространстве магнитопровода, то жидкость подвергается многократной обработке магнитным полем. Из-за того, что поперечное сечение канала - прямоугольник, у которого отношение сторон значительное (канал плоский), и он расположен в межполюсном пространстве так, что большая сторона канала перпендикулярна вектору магнитной индукции, эффективность магнитной обработки жидкости увеличивается. Это связано с тем, что в небольшом воздушном зазоре можно создать значительную напряженность магнитного поля. Требуемая производитель-

ность может быть обеспечена при соответствующем соотношении сторон сечения канала для жидкости и размеров полюсов магнитопровода.

Аппарат для магнитной обработки жидкости. Авторы Михальчук А. Н., Фомичев В. Т., Горячев О. Н. Корик О. Н., Оськин В. А. [10]

Аппарат для магнитной обработки жидкости (рисунок 2.14) включает диамагнитную трубу 1, внутри которой помещен ферромагнитный сердечник 2. На диамагнитной трубе установлены магнитопроводы 3, состоящие из двух половин, причем с возможностью перемещения за счет резьбового соединения 4 вдоль диамагнитной трубы. Между разъемными магнитопроводами 3 установлена катушка 5, являющаяся электромагнитом. Для защиты обмотки электромагнита установлен диамагнитный кожух 6. В зависимости от величины воздушного зазора 7 между частями магнитопровода меняется магнитный поток, а следовательно и напряженность магнитного поля в кольцевом зазоре 8.

Устройство работает следующим образом.

При подаче электрической энергии на катушку 5 создается, магнитопроводами 3 и сердечником 2, магнитный поток. Этот магнитный поток регулируется за счет перемещения магнитопроводов относительно друг друга, образуя между собой определенный воздушный зазор 7. При увеличении воздушного зазора, напряженность магнитного поля снижается и наоборот. Величина воздушного зазора 7 магнитопровода 3 подбирается вращением двух или одной составных частей резьбового магнитопровода за счет резьбового соединения 4 с трубой 1.

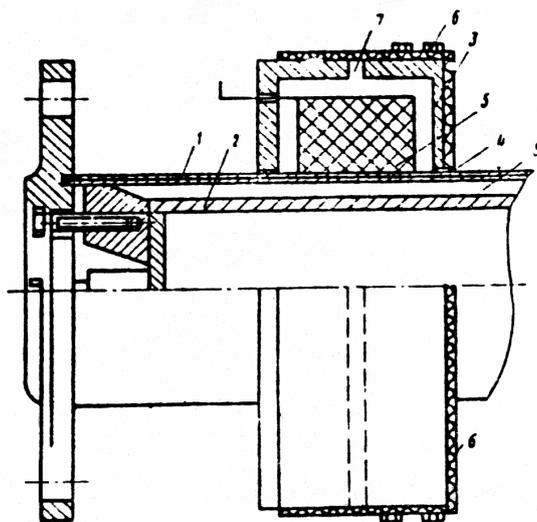


Рисунок 2.14 – Аппарат для магнитной обработки жидкости Михальчук А. Н., Фомичева В. Т., Горячева О. Н. Корик О. Н., Оськина В. А: 1 – диамагнитная труба; 2 – ферромагнитный сердечник; 3 – магнитопровод; 4 – резьбовое соединение; 5 – катушка; 6 – диамагнитный кожух; 7 – воздушный зазор; 8 – кольцевой зазор

Устройство для обработки воды в магнитном поле. Авторы Паньков А.Н, Богданов Г.М., Никитин Е.А. [60]

На рисунке 2.15 изображено устройство для магнитной обработки воды, общий вид.

Устройство состоит из цилиндрического корпуса 1, изготовленного из диамагнитного материала, с фланцами 2 для присоединения к трубопроводам. Внутри корпуса размещен составной сердечник 3, состоящий из ультразвукового преобразователя 4 с коническими концентраторами 5 и центрирующими втулками 6. На корпус насажены катушки 7 электромагнита, которые отделены одна от другой дисками 8. Катушки закреплены посредством фланцев шпильками 9.

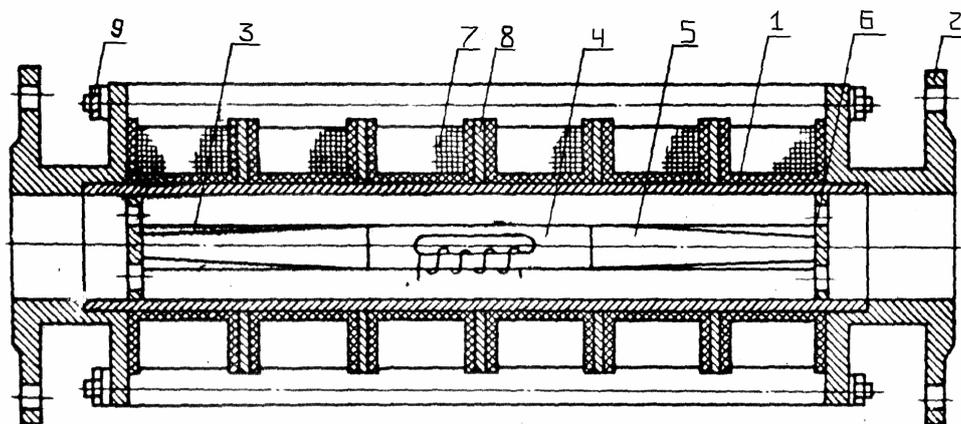


Рисунок 2.15 – Устройство для обработки воды в магнитном поле Панькова А.Н, Богданова Г. М., Никитина Е. А.: 1 – цилиндрический корпус; 2 – фланец; 3 – составной сердечник; 4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – конические концентраторы; 6 – центрирующие втулки; 7 – катушки электромагнита; 8 – диск; 9 – шпилька

Устройство работает следующим образом.

Подлежащая обработке вода подается в корпус 1 и проходит через рабочий зазор, образованный корпусом и сердечником 3. Перпендикулярно к направлению движения воды формируется магнитный поток. Катушки 7 отделены одна от другой дисками 8 с целью создания прямолинейного расположения магнитных силовых линий. Катушки намотаны на текстолитовых каркасах и включены встречно с целью создания и усиления одноименных полюсов. Устройство питается от сети напряжением 220 В через трансформатор ТБС-3-0.4. Питание ультразвукового преобразователя осуществляется от специального генератора ультразвуковой частоты модели УЗГ-3-0.4 или др.

Электрические колебания ультразвуковой частоты с помощью преобразователя преобразуются в механические колебания, которые усиливаются концентраторами и через центрирующие втулки передаются проходящей омагниченной воде. По мере роста кристаллов накипи на нагрева-

тельных поверхностях изменяются и их динамические характеристики, т.е. частота собственных колебаний. При совпадении частот собственных колебаний кристаллов накипи и частоты возмущающих колебаний кристаллов наступает момент резонанса. Сильные колебательные движения кристаллов приводят к механическому разрушению связей кристаллов с поверхностью нагрева. Кристаллы отделяются от поверхности нагрева и, находясь во взвешенном состоянии в толще воды, удаляются вместе с водой.

Магнитная система для устройств магнитной обработки жидкостей. Авторы В. В. Башинский, А. Л. Глузман, В. Г. Зерницкий, В. И. Классен, С. Ш. Лангерман, К. П. Петров, Н. Е. Пичугина и Д. Д. Успенский. [63].

На рисунке 2.16 а) изображено устройство магнитной обработки жидкостей, продольно - вертикальный разрез; б) разрез А-А.

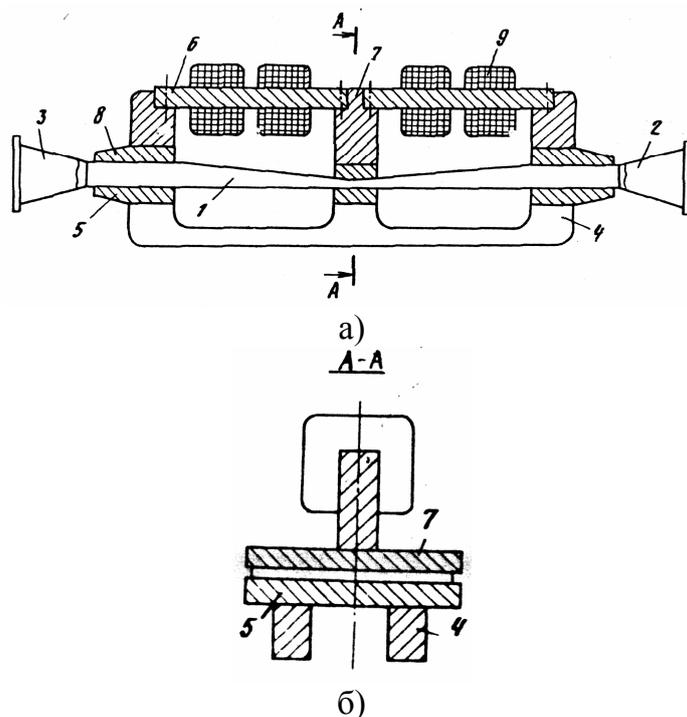


Рисунок 2.16 – Магнитная система для устройств магнитной обработки жидкостей В.В. Башинского, А.Л. Глузмана, В.Г. Зерницкого, В.И. Классена, С.Ш. Лангермана, К.П. Петрова, Н.Е. Пичугина и Д.Д. Успенского: 1 – короб; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – магнитопровод; 5 – полюсные наконечники; 6 – основание; 7 – выступ; 8 – полюсный наконечник; 9 – намагничивающая катушка

Устройство состоит из короба 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками, выполненными из диамагнитного материала, нижнего вспомогательного Ш-образного магнитопровода 4 с полюсными наконечниками 5 установленными на торцах стержней указанного магнитопровода 4, верх-

него основного магнитопровода, состоящего из основания 6 с выступами 7 и полюсными наконечниками 8. Основание выполнено в виде двух стержней, прикрепленных к выступам с помощью разъемного соединения с установленными на них катушками возбуждения 9. Магнитопроводы могут быть соединены между собой стяжками.

Омагничиваемая водная система через входной патрубок 2 поступает в короб 1 и движется в нем к выходному патрубку 3, пересекая по нормали силовые линии магнитного поля между полюсными наконечниками 5 и 8, которое создается индукционными катушками возбуждения 9.

Устройство для магнитной обработки жидкости. Авторы Коротов Н. Т. Косневич А. Г., Бурягин В. А., Джимиев А. Р. [27].

На рисунке 2.17 а) изображено устройство для магнитной обработки жидкости, продольный разрез; б)-разрез А-А.

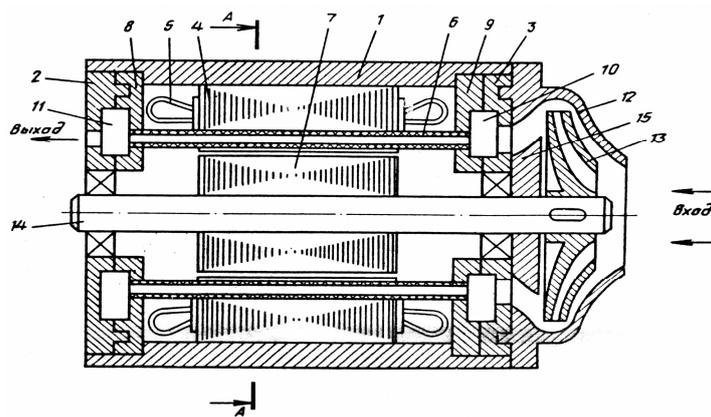
Устройство для магнитной обработки жидкости состоит из цилиндрического корпуса 1 и подшипниковых щитов 2 и 3. Внутри корпуса 1 помещен цилиндрический магнитопровод (статор) 4 с пазами на его внутренней поверхности, в которые уложена обмотка 5 и фиксирующие ее пазовые клинья 6. Последние выполнены со сквозными отверстиями (каналами) в осевом направлении. Обмотка 5 статора 4 питается от трехфазного источника тока.

Внутри статора 4 с зазором установлен ротор 7 с короткозамкнутой обмоткой типа «беличья клетка».

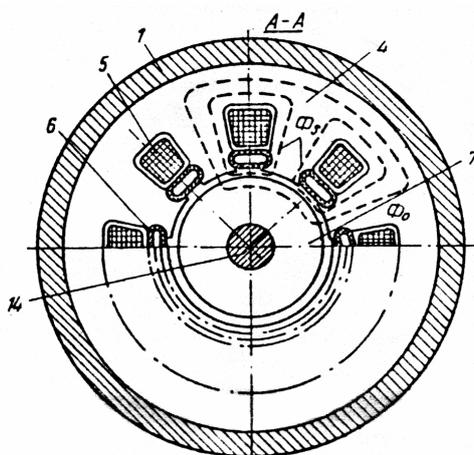
Начала и концы клиньев 6 введены без зазора в отверстия фланцев 8 и 9, которые совместно с подшипниковыми щитами 2 и 3 образуют входную 10 и выходную 11 полости.

К корпусу 1 посредством подшипникового щита 3 неподвижно прикреплен корпус насоса 12, рабочее колесо 13 которого неподвижно закреплено на валу 14 и приводится им во вращение.

Рабочая полость насоса 12 через отверстие 15 в его корпусе сообщена с входной полостью 10 устройства. В свою очередь полость 10 посредством клиньев 6 сообщена с выходной полостью 11 устройства.



а)



б)

Рисунок 2.17 – Устройство для магнитной обработки жидкости Авторы Коротов Н.Т. Косневич А.Г., Бурягин В.А., Джимиев А.Р: 1 – корпус; 2,3 – подшипниковые щиты; 4 – статор; 5 – обмотка статора; 6 – пазовые клинья; 7 – ротор; 8,9 – фланцы; 10,11 – входная и выходная полости; 12 – корпус насоса; 13 – рабочее колесо; 14 – вал; 15 – отверстие в корпусе

Устройство работает следующим образом.

При подключении обмотки 5 статора 4 к источнику переменного трехфазного тока в расточке статора создается вращающееся магнитное поле (как в обычной асинхронной электрической машине). Магнитное поле статора 4 при вращении пересекает короткозамкнутую обмотку ротора 7 и наводит в ней - электродвижущую силу, под действием которой в обмотке течет ток. В результате взаимодействия токов обмоток и ротора создается вращающий электромагнитный момент, который приводит ротор 7 и рабочее колесо 13 насоса 12 во вращение.

Насаженное на валу 14 рабочее колесо 13 насоса прокачивает жидкость, которая из насоса через отверстие 15 поступает во входную полость 10 и далее в осевые каналы клиньев 6. Протекая по каналам клиньев 6 в направлении нормали к магнитному полю, созданному обмоткой статора, жидкость подвергается магнитной обработке и поступает в полость 11.

В устройстве (рисунок 2.18), между секционированным сердечником из графитовых колец и металлического корпуса и металлическим электродом, на которых предусмотрены клеммы для присоединения источника постоянного тока, расположена токопроводящая диафрагма, разделяющая камеры получения щелочной и кислой воды, верх которой закреплен на верхнем фланце, а низ на распределительном кольце равномерной подачи воды, при этом в нижней части корпуса размещена электромагнитная система с убывающим магнитным потоком, между полюсами которой установлен регулятор скорости воды, соединенный с корпусом, внутрь которого введен металлический корпус секционированного сердечника. Преимущества устройства заключаются в том, что технологический процесс магнитно-электрической обработки воды, используемой для приготовления растворов реагентов, осуществляется в двух связанных между собой емкостях. В нижней емкости расположен конусообразный сердечник (магнитопровод), снаружи емкости установлена замкнутая электромагнитная система. Через зазор между конусообразным сердечником и электромагнитной системой пропускается вода, на которую воздействует магнитное поле в двух рабочих зонах с различной напряженностью магнитного поля и скоростью ее движения. В верхней емкости расположены электроды, а между ними диафрагма из токопроводящего материала (например, брезента).

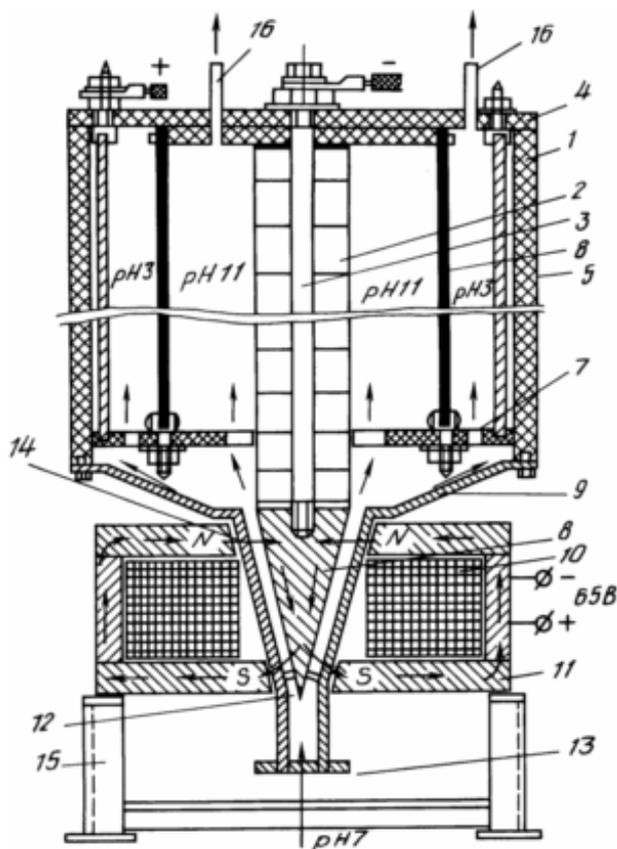


Рисунок 2.18 – Устройство магнитно-электрической обработки воды, общий вид

Устройство состоит из корпуса 1, изготовленного из органического стекла, внутри которого расположен секционированный сердечник из графитовых колец 2, установленных на шпильке 3 и закрепленных на фланце 4 между графитовым электродом 2 и металлическим электродом 5, расположенным по периметру внутреннего корпуса 1, расположена токопроводящая диафрагма 6, закрепленная на фланце 4 и нижнем распределительном кольце 7 равномерной подачи воды, к шпильке 3 привинчивается металлический конус-сердечник магнитопровод 8, который расположен по центру корпуса регулятора 9 скорости, изготовленного из нержавеющей стали. Снаружи регулятора скорости расположена электромагнитная система, включающая намагничивающую катушку 10, магнитопровод 11 и конусообразный сердечник 8. Между конусным сердечником 8 и корпусом регулятора скорости образуется зазор 12 для тока обрабатываемой воды, подаваемой по патрубку 13, в зонах магнитных потоков соответствующей напряженности магнитного поля. Все устройство устанавливается на подставку 14.

Устройство работает следующим образом.

Исходная вода поступает через входной патрубок 13 в нижний конус и проходит через зоны магнитного потока, создаваемого замкнутой электромагнитной системой 10, 11, 8, где подвергается обработке магнитным полем соответствующей напряженности, затем вода поступает в верхнюю часть корпуса, где при наличии тока, протекающего между электродами 2 и 5 в объемах, разделенных диафрагмой 6, образуется кислая и щелочная вода, поступающая через выходные патрубки 15 в смесительные емкости приготовления растворов реагентов (коагулянта).

Пример. Изготовлено устройство для магнитно-электрической обработки воды производительностью 6 м³/ч. На корпусе, выполненном из органического стекла СТ-1 ГОСТ 15809-70е с наружным диаметром 648 мм и длиной 1287 мм, устанавливается верхний фланец из органического стекла толщина стенки 24 мм. По центру просверлено отверстие под графитовый электрод ГОСТ 18191-78 диаметром 72 мм, диаметр графитового стержня 200 мм длиной 725 мм с резьбой М 72х2. В верхней части фланца сверлятся 26 отверстий диаметром 10 мм для присоединения к корпусу устройства. Для присоединения к фланцу электрода из ст. ВТ6С ГОСТ 19807-74 диаметром 530 мм, длиной 862 мм просверлено 8 отверстий диаметром 10 мм. К электроду приварены стяжные болты М10. Внутри фланца присоединен фланец меньшего диаметра, выполненный из органического стекла диаметром 400 мм. По окружности просверлено 8 отверстий для крепления разделительной перегородки из брезента ГОСТ 2306-69. В нижней части брезента установлено кольцо диаметром 400 мм, к которому присоединены 8 вилок-болтов. Они скрепляют распределительное

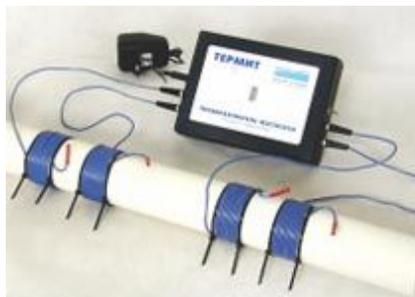
кольцо из оргстекла подачи воды, кольцо служит и для натягивания брезента.

Все детали на фланце вводятся в корпус и затягиваются гайками М10. Для подачи электрического тока одна клемма крепится к металлическому электроду, вторая к графитовому электроду. В крышке фланца имеются два выпуска один выпуск для отвода щелочной воды, второй для отвода кислой воды.

К нижней части корпуса, разделяющего воду на кислую и щелочную, присоединен фланец, к которому крепится электромагнитная система. Корпус магнитопровода изготовлен из Ст-3 ГОСТ 380-71 диаметром 300 мм и длиной 200 мм, внутри расположена электромагнитная катушка, намотанная проводом диаметром 1,25 мм количество витков 1080. Внутри корпуса электромагнитного аппарата установлен конусный сердечник, прикрепленный к графитовому электроду наибольший диаметр 200 мм. Конструкция конусного сердечника создает сначала сильное магнитное поле с переходом на убывающее магнитное поле, которое дает начальное движение электронов к своим положительным или отрицательным источникам энергии. В нижней части электромагнитной системы имеется входной патрубок 1. Вся конструкция устанавливается на раме. Основные данные намагничивающей катушки: провод марки ПЭВ-1 ГОСТ 7262-78, диаметром 1,25 мм, количество витков 1080, сопротивление 9,05 Ом, масса провода 24 кг, потребляемая мощность 0,4 кВт, номинальный ток 6 А, расчетное напряжение 65 В. Для электродов напряжение 220 В, выпрямленный ток 15 А, мощность для электродов 3,5 кВт. Для устройства необходимо два выпрямительных устройства: для магнитного аппарата – ВСА 5К, для электродов – ЗУК 75/120 М У5. Устройство для магнитно-электрической обработки воды позволяет повысить качество очистки воды в среднем на 35 % снизить расход реагентов в среднем на 50 % с получением осветленной воды требуемого качества.

Устройство магнитно-электрической обработки воды, включающее корпус, электроды, электромагнитную систему, впускной и выпускной патрубки, распределитель равномерной подачи воды, клеммы для присоединения источника постоянного тока, содержит секционированный сердечник из графитовых колец с металлическим конусом и токопроводящую диафрагму, установленную между секционированным сердечником и электродом с образованием камер получения щелочной и кислой воды, а также регулятором скорости, причем диафрагма закреплена своими концами, соответственно, на верхнем фланце корпуса и на распределителе равномерной подачи воды, при этом магнитная система выполнена с убывающим магнитным потоком и установлена в нижней части корпуса снаружи регулятора скорости, а металлический конус размещен внутри регулятора скорости.

Аппараты серии «Термит» – электронные преобразователи солей жесткости - помогают бороться с накипью. Это приборы настенного типа, очень просто устанавливаются на трубопроводы без демонтажа коммуникаций. Электромагнитная обработка воды в диапазоне частот от 1 до 10 кГц, обеспечивает удаление старых отложений солей жесткости и предотвращает появление новых.



Термит



Термит-М



Термит-Люкс

Рисунок 2.19 – Аппараты «Термит»

Причем затраты электроэнергии сопоставимы с энергопотреблением лампочки карманного фонарика. Сейчас выпускаются 3 модификации приборов, рассчитанные на разных потребителей. Это приборы «Термит», «Термит Люкс» для бытовых нужд и малых производств, и приборы «Термит-М» - для промышленных нужд.

1.4.3 Анализ перспектив проектирования аппаратов магнитной обработки воды

Конструирование, производство и эксплуатация аппаратов для магнитной обработки водных систем чрезвычайно затруднена тем, что отсутствуют научные основы этого процесса, доведенные до стадии инженерных расчетов и не проводятся четкие сравнительные испытания различных аппаратов для изучения влияния их конструктивных элементов на процесс омагничивания. Создание и изготовление аппаратов производится на основе качественных представлений о механизме явлений, практики эксплуатации аппаратов в России и за рубежом, а иногда исходя из чисто интуитивных соображений.

При создании аппаратов учитывается необходимость разработки конструкций, которые, наряду с эффективным воздействием на водные системы, позволяют достигнуть высокого коэффициента использования магнитных источников, отличаются простотой и надежностью, по возможности, могут быть изготовлены из дешевых материалов и не создают больших потерь напора. От размера последнего фактора, характеризующего степень гидродинамического совершенства аппарата, зависит его производительность.

Анализ характеристик и эффективности применения аппаратов, а также рассмотрение многочисленных конструкций аппаратов [4...64], позволил выявить следующие тенденции в проектировании аппаратов:

а) рабочий зазор аппаратов лежит в пределах нескольких сантиметров. Этот зазор очень часто забивается и тем самым снижает производительность аппарата;

б) как правило, стремятся к созданию высокой напряженности магнитного поля в рабочих зазорах;

в) наряду с многополюсными аппаратами, в которых обеспечивается сравнительно большое время пребывания обрабатываемой системы в поле, имеются и высокоэффективные униполярные аппараты (например, фирмы Эпуро);

г) появление новых конструкций магнитных аппаратов с вращающимся полем, со скрещенными магнитными полюсами и т. д.;

д) отказ от регулирования магнитной индукции в рабочих зазорах;

е) более широкое применение аппаратов с постоянными магнитами (по пропускной способности эти аппараты превышают электромагнитные);

ж) повышение требований к ремонтпригодности;

и) улучшение гидравлических характеристик аппаратов (предпочтение отдается прямоточным аппаратам).

При серийном выпуске аппаратов очень важно максимально сократить расход дорогостоящих магнитных сплавов или медного обмоточного провода.

Эффект от обработки воды магнитным полем, зависит от электромагнитных характеристик аппарата и свойств воды:

- индукции;
- градиента напряженности в зазоре аппарата;
- скорости потока воды;
- времени воздействия магнитного поля;
- количества пересечений магнитного поля;
- концентрации солей;
- количества агрессивной двуокиси углерода.

При проектировании новых аппаратов необходимо производить их расчет на соответствие определенным критериям. Учет приведенных критериев позволит сократить расход цветных металлов и ферромагнитных материалов аппарата на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ расхода воды [136].

При проектировании, очень часто, сталкиваются с противоречивостью выбора из множества критериев. Необходимо учитывать важность критериев в каждом конкретном случае.

Так как научно обоснованных параметров магнитного поля при обработке воды в настоящее время нет, то необходимо использовать данные полученные ранее.

При экспериментальных исследованиях большого количества аппаратов выявлено, что для вод с карбонатной жесткостью около 5 мг-экв/л , достижим эффект при напряженности магнитного поля $4 \dots 8 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ($500\text{-}1000 \text{ Э}$) и скорости водяного потока $1 - 1,5 \text{ м/с}$.

Положительные результаты на установках малой энергетики по предотвращению образования накипи для вод с карбонатной жесткостью до 7 мг-экв/л , получаются при напряженности магнитного поля $9,6 - 12 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ($1200 - 1500 \text{ Э}$) и скорости воды $1,5 - 2,5 \text{ м/с}$.

Результаты обработки могут быть улучшены за счет применения многократного воздействия на воду.

Скорость воды в аппарате не имеет решающего значения для достижения эффекта. Оптимальные результаты получены при скорости воды $1,0 - 2,5 \text{ м/с}$ [135].

При дальнейшем совершенствовании конструкций аппаратов следует уделить особое внимание увеличению рабочего зазора. Принято считать, что чем меньше напряженность магнитного поля в рабочем зазоре, тем более длинным должен быть путь прохождения жидкости в нём.

Обобщая опыт эксплуатации аппаратов в промышленных условиях, можно составить следующие рекомендации, позволяющие получать устойчивые положительные результаты:

1) во всех случаях должна осуществляться предварительная настройка аппаратов. Работу аппарата необходимо систематически (не реже 1 – 2 раз в сутки) контролировать методом, моделирующим данный процесс;

2) расход воды, как и ее состав, должны быть максимально стабилизированы;

3) межполюсный канал должен быть заполнен водой с тем, чтобы исключить образование в нем воздушных пробок и застойных зон. Для этого необходимо подавать воду (или суспензию) в аппарат снизу вверх и периодически промывать канал. Для удаления от полюсов скоплений магнитных частиц аппаратурного железа, необходимо систематически переключать полюса электромагнитов. Аппараты с постоянными магнитами нужно своевременно очищать.

В настоящее время накоплен большой опыт применения магнитной обработки воды в системах горячего водоснабжения и теплоснабжения. Потребность в экономичном и простом методе водоподготовки для этих систем велика. Статистические исследования использования методов водоподготовки говорят о том, что в Ставропольском крае и КЧР 72 % котлов не используют предварительную водоподготовку. Она используется только лишь на котельных подведомственных гостехкотлонадзору. Так как основная часть котлов находится в сельской местности, применение ионитной водоочистки нерентабельно. Однако, кроме экономии средств на подготовке воды, существуют показатели, по которым магнитная водоподготовка выгодно отличается от других способов.

При соблюдении технологической схемы и параметров магнитного поля, данный способ водоподготовки позволяет избавиться от образования накипи на стенках теплотехнического оборудования, а так же удалить ранее образовавшуюся накипь.

Технологическая схема водоподготовки с использованием АМОВ утверждается исходя из реальной схемы с добавлением в нее грязевиков – шламоуловителей. Так же необходимо учитывать особый режим продувок системы и контроля за эффективностью обработки воды.

Патентный поиск существующих аппаратов магнитной обработки воды позволил выявить ряд их недостатков. Основным из которых является наличие узкощелевого зазора, в котором происходит обработка воды основным магнитным потоком.

Устранить этот недостаток позволит отказ от обработки воды основным магнитным потоком и переход к обработке полями «выпучивания».

2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ АМОВ

2.1 ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1.1 Электромагнитное поле как форма существования материи

В повседневной жизни мы находимся в непрерывном соприкосновении с объектами материального мира, которые принято разграничивать на вещество и поле. На современном этапе развития физики различают следующие разновидности полей: гравитационные, электромагнитные, внутриатомные и другие.

Первые сведения об электромагнитных явлениях человечество получило тысячи лет назад. Однако, наблюдая, например, факты взаимодействия двух или нескольких электрически заряженных тел или притяжение магнитными телами металлических предметов, человек не мог дать им сколь-либо приемлемое научное объяснение, тем более найти и объяснить их взаимосвязь. О том, что электрические и магнитные явления связаны друг с другом, поведал миру Эрстед в 1820 году, продемонстрировавший свой знаменитый опыт взаимодействия магнитной стрелки, которой пользовались в Китае еще на заре прошлого тысячелетия, с проводником с током. Выводы, сделанные Эрстедом распространялись лишь на действие тока на магнит. В 1831 году М. Фарадей открыл «обратное явление»: магнитного поля на ток. Данное Ампером физическое объяснение опытов и их многократное подтверждение показали связь электрических и магнитных явлений. Обобщение и математическое описание электромагнитных процессов впервые сделал Д. К. Максвелл в 1864 году [106]. Главным выводом, является вывод о существовании в природе электромагнитных волн. Предсказанные им же электромагнитные волны в 1888 году экспериментально обнаружил Г. Герц.

Воплощение теории электромагнитных волн в практику впервые было осуществлено в 1895 году А. С. Поповым, открывшим миру радиосвязь.

Диалектический материализм рассматривает электромагнитное поле как особый вид материи, проявляющей себя посредством сил, действующих на заряженные частицы.

Поскольку вещество и поле - разновидности материи, то они характеризуются одинаковыми свойствами (например: обладают инертной и гравитационной массами), однако, имеют и различные свойства (например: поля обладают свойством взаимопроникновения, т. е. в одном и том же объеме может существовать не одно, а сразу несколько полей; поле не имеет массы покоя и т.п.).

Электромагнитное поле, как и любая материальная частица обладает:

m – массой $\frac{hf}{c^2}$;

W – энергией hf ;

количеством движения $\frac{hf}{c}$.

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

f – частота электромагнитных колебаний;

c – скорость света.

Для удобства рассмотрения электромагнитное поле в ряде случаев делят на электрическое и магнитное. Электрическое и магнитное поля - это две стороны единого электромагнитного процесса, проявляющиеся в зависимости от конкретных условий.

Электрическое поле выявляется по действию на неподвижные электрические заряды, а магнитное - по действию на движущиеся заряды.

По определению, принятому Комитетом технической терминологии АН СССР, электромагнитное поле - особая форма (вид) материи, отличающаяся непрерывным распределением в пространстве (электромагнитные волны) и обеспечивающая дискретность структуры (фотоны), характеризующаяся способностью распространяться в вакууме (в отсутствие сильных гравитационных полей) со скоростью, близкой к $3 \cdot 10^8$ м/с, оказывающей на заряженные частицы силовое воздействие, зависящее от их скорости.

2.1.2 Основные характеристики электромагнитного поля

Для описания электромагнитного поля необходимо характеризовать его в каждой точке пространства в каждый момент времени как по величине, так и по направлению. Наиболее наглядно электромагнитное поле проявляет себя посредством силового воздействия на заряженные частицы вещества и характеризуется силами, действующими на помещенные в поле заряды [128]. Поскольку силы являются векторными величинами, описание электромагнитного поля и построение его математической модели необходимо производить с помощью векторных величин. С целью облегчения анализа электромагнитный процесс принято описывать в виде суммы электрического и магнитного полей, а в качестве величин, характеризующих их силовое взаимодействие с движущимся зарядом в свободном пространстве (вакууме), применяют *вектор напряженности* элек-

трического поля \vec{E} и вектор магнитной индукции \vec{B} . Сила \vec{F} , действующая на точечный заряд, движущийся в электромагнитном поле со скоростью \vec{V} определяется выражением

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot |\vec{V} \times \vec{B}|, \quad (2.1)$$

где q – величина заряда;

$\vec{V} \times \vec{B}$ – векторное произведение векторов (рисунок 2.1).

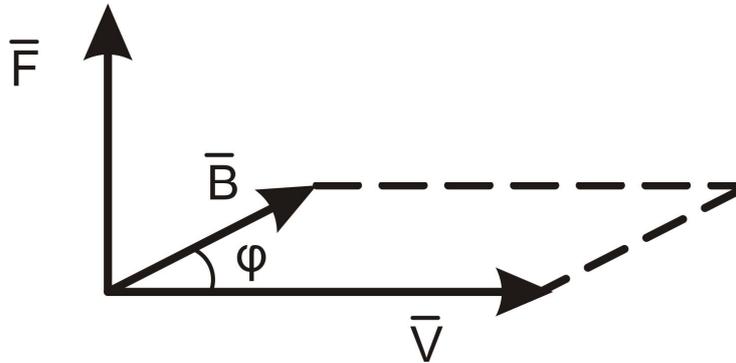


Рисунок 2.1 – Векторное произведение векторов

$|\vec{F}| = |\vec{V} \times \vec{B}| = |\vec{V}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \varphi = S$ – площадь параллелограмма, со сторонами \vec{V} и \vec{B} .

Выражение (2.1) позволяет дать векторам \vec{E} и \vec{B} определения, а также рассмотреть особенности взаимодействия заряженных частиц с электрическим и магнитным полями.

Вектор напряженности электрического поля \vec{E} характеризует силовое воздействие электрического поля на электрические заряды. Его определяют из выражения (2.1) как силу, действующую на точечный положительный единичный заряд (пробный заряд) при условии $V = 0$, т.е.

$$\vec{E} = \vec{F} / q \left[\frac{H}{Кл} = \frac{B}{м} \right]. \quad (2.2)$$

Единицей измерения напряженности электрического поля в системе СИ является $B / м$.

Для наглядности восприятия и анализа силовое поле изображают с помощью силовых линий напряженности электрического поля. Силовую линию проводят таким образом, чтобы касательная к ней в любой точке совпадала с направлением вектора \vec{E} в этой точке. Стрелки на силовых линиях указывают направление касательных (векторов \vec{E}), совпадающее с направлением вектора силы \vec{F} , величина и направление которой при действии на пробный заряд q поля заряда Q определяется законом Кулона. Если заряд Q положителен, то вектор \vec{E} направлен от заряда, если отрицателен – к заряду. Построение векторграммы принято проводить так, чтобы их густота (плотность) была пропорциональна модулю (величине)

вектора поля. Следует отметить, что Электрическое поле действует как на неподвижные ($V = 0$), так и на движущиеся заряды.

Вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует силовое воздействие магнитного поля на движущиеся электрические заряды.

Действительно, если движение электрического точечного заряда происходит только в магнитном поле ($\vec{E} = 0$), сила, действующая на него согласно формулы (2.1), характеризуется величиной $\vec{F} = q|\vec{V} \times \vec{B}|$, т.е. пропорциональна величине и скорости заряда, зависит от взаимной ориентации векторов \vec{V} и \vec{B} , перпендикулярна им и имеет максимальное значение при движении заряда перпендикулярно магнитному полю:

$$F_{\max} = qVB. \quad (2.3)$$

откуда следует что, модуль магнитной индукции

$$B = \frac{F_{\max}}{qV} \left[\frac{H \cdot c}{Kл \cdot м} = \frac{Вб}{м^2} = Тл \right], \quad (2.4)$$

т.е. равна силе воздействия магнитного поля на пробный заряд, перемещающийся перпендикулярно магнитному полю с единичной скоростью и измеряется в системе СИ в отношении Вебер на метр квадратный ($\frac{Вб}{м^2}$) или Теслах ($Тл$).

При исследовании электромагнитных явлений в свободном пространстве распределение векторов напряженности электрического поля \vec{E} и магнитной индукции \vec{B} , в любой точке пространства полностью характеризует электромагнитное поле.

Для характеристики электромагнитных полей в материальных средах отличных от свободного пространства (вакуума) введенных векторов \vec{E} и \vec{B} недостаточно.

Сила взаимодействия зарядов, а значит и напряженности электрического поля зависят от характера среды, в которой происходит взаимодействие. Влияние вещества среды на электрическое поле вызывается поляризацией вещества под действием поля. При этом молекулы вещества, обладающие собственным дипольным моментом и хаотически ориентированные в отсутствие внешнего электрического поля, приобретают под его воздействием упорядоченную ориентацию, создавая собственное электрическое поле, а свободные заряды начинают двигаться направленно (см. рисунок 2.2).

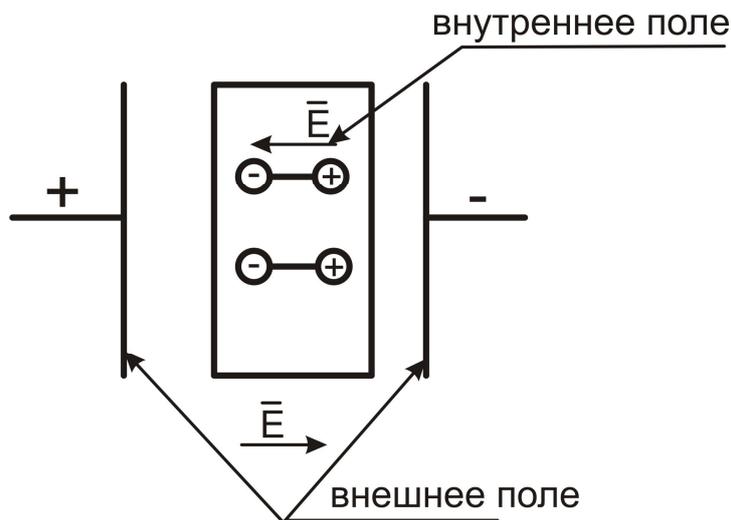


Рисунок 2.2 – Поляризация вещества

Для описания электрического поля в средах вводится вектор электрической индукции \bar{D} :

$$\bar{D} = \varepsilon_a \cdot \bar{E}, \quad \left(\frac{\Phi}{\text{м}} \cdot \frac{\text{В}}{\text{м}} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right) \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_a \left[\frac{\Phi}{\text{м}} \right]$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{отн}}, \quad (2.6)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, в системе СИ

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[\frac{\Phi}{\text{м}} \right],$$

тогда в вакууме:

$$\bar{D} = \varepsilon_0 \bar{E}, \quad (2.7)$$

в среде

$$\bar{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{отн}} \bar{E} = \varepsilon_0 \bar{E} + \bar{P}, \quad (2.8)$$

где $\bar{P} \left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right]$ – поляризованность вещества,

$$\bar{P} = \varepsilon_0 K_s \bar{E}, \quad (2.9)$$

где K_s – диэлектрическая восприимчивость (безразмерный коэффициент, характеризующий среду).

Основное достоинство вектора \bar{D} заключается в его независимости от параметров среды. Действительно, если амплитуда напряженности поля точечного заряда q , находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью ε_a на расстоянии r от заряда, определяется выражением

$$E = \frac{q}{4\pi r^2 \varepsilon_a}, \quad (2.10)$$

то амплитуда вектора электрической индукции на основании (2.4) определяется только величиной этого заряда

$$D = q/(4\pi r^2). \quad (2.11)$$

В общем случае, когда поле создается не одним точечным зарядом, а совокупностью произвольно расположенных зарядов, вектор \bar{D} будет определяться величинами и взаимным расположением зарядов относительно точки наблюдения. Таким образом, введение вектора \bar{D} упрощает описание электромагнитных полей в веществе и позволяет получить соотношения для любых сред, независимо от их электромагнитных свойств.

При воздействии магнитного поля на движущийся заряд (или проводник с током) величина вектора \bar{B} также зависит от свойств среды. Эта зависимость объясняется намагничиванием вещества, в результате которого на внешнее магнитное поле накладывается дополнительное поле вещества. При этом в зависимости от свойств вещества возможно, как ослабление первичного магнитного поля в диамагнитных средах, так и усиление в парамагнитных, особенно в ферромагнитных средах.

Рисунок 2.3 иллюстрирует процесс намагничивания вещества.

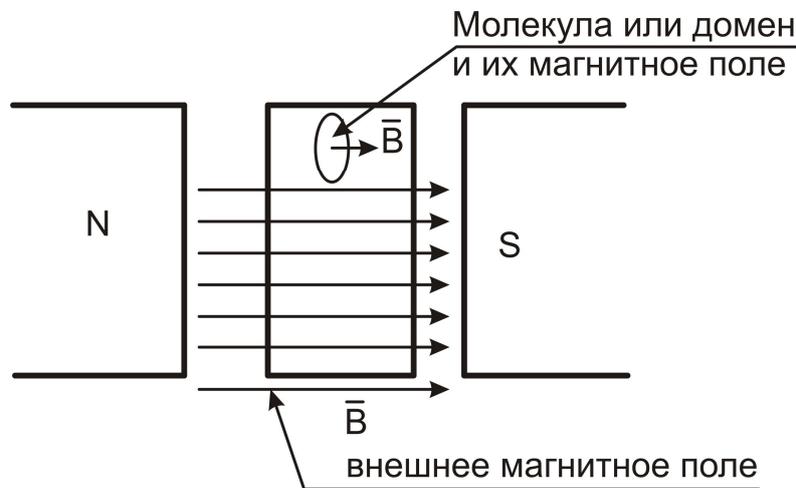


Рисунок 2.3 – Намагничивание вещества

Для описания магнитного поля в различных средах, вводится вектор \bar{H} – напряженности магнитного поля:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_a} \left[\frac{A}{M} \right], \quad (2.12)$$

где $\mu_a \left[\frac{\Phi}{M} \right]$ – абсолютная магнитная проницаемость среды характеризует взаимодействие магнитного поля и среды.

$$\mu_a = \mu_o \cdot \mu_{отн}, \quad (2.13)$$

где μ_o – абсолютная магнитная проницаемость вакуума в СИ $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$.

Таким образом, в вакууме напряженность магнитного поля

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_o}. \quad (2.14)$$

в среде:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_o \cdot \mu_{отн}} = \frac{\bar{B}}{\mu_o} - \bar{J}, \quad (2.15)$$

где \bar{J} – намагниченность вещества.

Таким образом, электромагнитное поле в любой среде полностью характеризуется векторными величинами $\bar{E}, \bar{H}, \bar{D}, \bar{B}$.

Следует также отметить, что они были введены в результате обобщения большого числа экспериментальных данных, выражением которых являются основные законы электромагнитного поля (закон Кулона, закон Фарадея и др.).

2.1.3 Электромагнитные параметры и классификация сред

Диэлектрическая и магнитная проницаемость совместно с удельной проводимостью σ дают полную характеристику электрических свойств среды. Два первых параметра рассмотрены выше и, соответственно, определяют способность среды поляризоваться при воздействии электрического поля (ϵ_a) и намагничиваться при воздействии внешнего магнитного поля (μ_a). Третий параметр входит в уравнение, характеризующее воздействие электрического поля на свободные заряженные частицы вещества, под действием которого последние приобретают ориентированное движение, т.е. имеет место ток проводимости [142]. Плотность этого тока и определяется указанным уравнением, представляющим собой закон Ома в дифференциальной форме:

$$\bar{j} = \sigma \cdot \bar{E}, \quad (2.16)$$

где \bar{j} – вектор плотности электрического тока, $A/м$;
 σ – удельная электрическая проводимость, $См/м$.

Таким образом, σ характеризует степень электропроводимости среды.

В зависимости от свойств параметров ϵ_a, μ_a и σ среды подразделяют на *линейные*, у которых эти параметры не зависят от величины электрического и магнитного полей, и *нелинейные*, у которых ϵ_a, μ_a и σ (или хотя бы один из них) зависят от величин электрического и магнитного полей. Практически все реальные среды являются нелинейными, однако, нелинейность проявляется лишь в очень сильных полях, создаваемых в специальных установках.

В дальнейшем будем рассматривать только линейные среды, которые в свою очередь делятся, на однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные [16].

Однородными называются среды, параметры которых не зависят от координат и одинаковы во всех точках рассматриваемой среды.

Неоднородные - среды, у которых хотя бы один из параметров ϵ_a, μ_a или σ является функцией координат.

Изотропные - среды, свойства которых не зависят от направления. Для изотропных сред параметры $\epsilon_a, \mu_a, \sigma$ являются скалярными величинами, а векторы \bar{D} и \bar{E} ; \bar{B} и \bar{H} ; \bar{j} и \bar{E} всегда параллельны и связаны между собой соотношениями (2.7), (2.12), (2.16).

Анизотропными называются среды, свойства которых (хотя бы по одному из параметров $\epsilon_a, \mu_a, \sigma$) различны в различных направлениях.

В анизотропных средах векторы \bar{D} и \bar{E} , \bar{B} и \bar{H} , \bar{j} и \bar{E} могут не совпадать по направлению. Параметры таких сред (или хотя бы один из них) являются тензорными величинами, определяемыми соответствующей матрицей

$$\begin{aligned} \|\epsilon\| &= \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix}; \\ \|\mu\| &= \begin{vmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{vmatrix}; \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\|\sigma\| = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}.$$

Тогда связь между векторами поля будет определяться как

$$\bar{D} = \|\varepsilon\| \cdot \bar{E}; \quad \bar{B} = \|\mu\| \cdot \bar{H}; \quad \bar{j} = \|\sigma\| \cdot \bar{E}. \quad (2.18)$$

Проводящие свойства среды в переменных полях, кроме проводимости (σ), зависят также и от частоты колебаний (f). В связи с этим среды подразделяются на диэлектрические, полупроводниковые и проводящие, последние будут подробно рассмотрены далее.

2.1.4 Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах

Все электромагнитные процессы макроскопической электродинамики подчиняются законам впервые формализованным (представленным в виде уравнений) физиком Джеймсом Клерком Максвеллом. Максвелл впервые решил фундаментальную задачу, обобщив имеющиеся экспериментальные закономерности на произвольное электромагнитное поле в произвольной среде (1864).

Определить электромагнитное поле в некоторой области пространства - значит найти распределение и величины векторов $\bar{E}, \bar{H}, \bar{D}, \bar{B}$ при известных параметрах среды и создающих это поле источниках.

Первое уравнение Максвелла в интегральной форме является обобщением закона полного тока (закона Ампера), связывающего циркуляцию вектора напряженности магнитного поля \bar{H} по любому замкнутому контуру L с током проводимости I и переменным электрическим полем $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$ пронизывающим этот контур (рисунок 2.4).

Первое уравнение Максвелла в интегральной форме

$$\oint_l \bar{H} \cdot d\bar{l} = I_{\text{полн}}, \quad (2.19)$$

где $I_{\text{полн}} = I_{\text{пр}} + I_{\text{см}}$ - полный ток;

$$I_{\text{пр}} = \int_s \bar{J}_{\text{пр}} d\bar{s} \text{ - ток проводимости;}$$

$$I_{см} = \frac{d}{dt} \int_S \bar{D} d\bar{s} \quad \text{– ток смещения (так как в случае постоянства во}$$

времени и пространстве поверхности интегрирования операции дифференцирования и интегрирования можно менять местами, а $\frac{\partial}{\partial t}$

– на $\frac{d}{dt}$

$\int_S \bar{D} d\bar{s}$ – поток вектора электрической индукции \bar{D} через любую

поверхность S , опирающуюся на контур L , $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$ – плотность тока смещения.

Выражение (2.19) читается так: циркуляция вектора напряженности магнитного поля \bar{H} по замкнутому контуру равна сумме тока проводимости и производной по времени от потока вектора электрической индукции через поверхность S , ограниченную данным контуром.

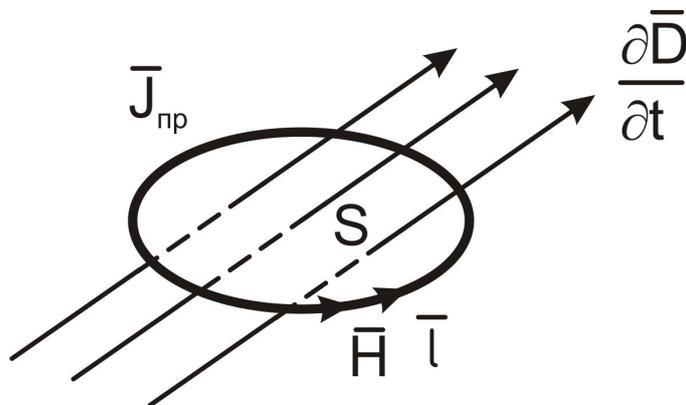


Рисунок 2.4 – К определению первого уравнения Максвелла

Из первого уравнения Максвелла в интегральной форме следует, что, циркуляция вектора напряженности магнитного поля \bar{H} вдоль замкнутого контура L определяется полным током, равным сумме тока проводимости $I_{пр}$, тока смещения $I_{см}$ через поверхность S , ограниченную данным контуром (рисунок 2.4).

Физический смысл первого уравнения Максвелла: вихревое магнитное поле возбуждается током проводимости, и изменяющимся во времени электрическим полем.

Применим теорему Стокса:

$$\oint_l \bar{v} d\bar{l} = \int_s \text{rot} \bar{v} d\bar{s} \quad (2.20)$$

где \bar{v} – циркуляция векторного поля;

$d\bar{S}$ – замкнутая кривая ограничивающая поверхность S ;

$\text{rot} \bar{v}$ – проекция на внешнюю нормаль к поверхности;

к левой части уравнения (2.19)

$$\oint_l \bar{H} d\bar{l} = \int_s \text{rot} \bar{H} d\bar{s} = \int_s \bar{j}_{np} d\bar{s} + \frac{\partial}{\partial t} \int_s \bar{D} d\bar{s}, \quad (2.21)$$

т. к. поверхность S выбирается произвольно, то подынтегральные выражения одинаковы

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j}_{np} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.22)$$

получаем первое уравнение Максвелла в дифференциальной форме.

Уравнение Максвелла в дифференциальной форме определяет взаимосвязь между векторами поля в каждой точке пространства.

Второе уравнение Максвелла в интегральной форме является обобщением закона электромагнитной индукции, открытого Фарадеем, и связывающим наводимую в замкнутом проводящем контуре ЭДС с изменяющимся во времени магнитным потоком, пронизывающим этот контур (рисунок 2.5).

$$\int_l \bar{E} d\bar{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s \bar{B} d\bar{S} \quad (2.23)$$

Полученное второе уравнение Максвелла в интегральной форме читается так: циркуляция вектора напряженности электрического поля \bar{E} по любому замкнутому контуру \bar{l} определяется скоростью изменения потока вектора магнитной индукции \bar{B} через поверхность S , ограниченную данным контуром

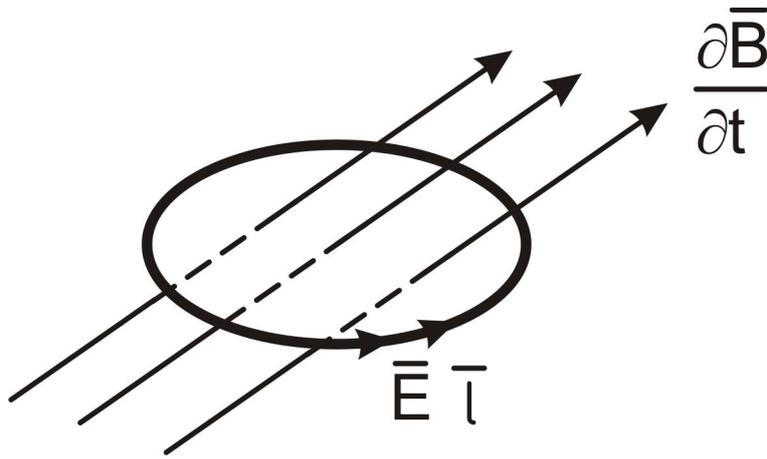


Рисунок 2.5 – К определению второго уравнения Максвелла

Физический смысл: изменяющееся во времени магнитное поле $\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$ вызывает появление вихревого электрического поля \bar{E} .

Аналогично, используя теорему Стокса:

$$\text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (2.24)$$

получаем второе уравнение Максвелла в дифференциальной форме.

Физический смысл – если в некоторой точке $\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \neq 0$, то в этой точке существует вихревое электрическое поле.

Знак «минус» следует из правила Ленца, гласящем, что индуктивный ток в контуре имеет всегда такое направление, при котором создаваемый им собственный поток сквозь поверхность, ограниченную контуром препятствует изменению магнитного потока Φ , вызывающего появления индуктивного тока.

Третье уравнение Максвелла в интегральной форме, является обобщением закона Гаусса, который, как известно, получен экспериментально и связывает поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность S с зарядом Q , сосредоточенным внутри этой поверхности (рисунок 2.6).

$$\oint_S \bar{D} d\bar{S} = \int_V \rho dV = \Sigma Q \quad (2.25)$$

где ρ – плотность объемного заряда.

Или :

$$\oint_S \bar{D} d\bar{S} = Q, \quad (2.26)$$

где заряд Q может быть произвольным образом распределен внутри поверхности S , ограничивающей некоторый объем V (рисунок 2.6).

Уравнение (2.25) читается так: поток вектора электрической индукции через замкнутую поверхность равен суммарному электрическому заряду внутри этой поверхности.

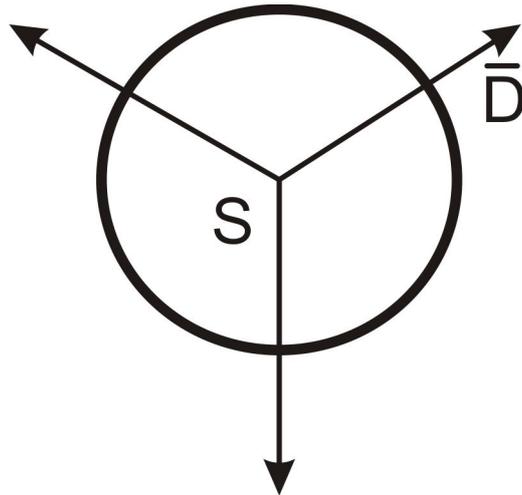


Рисунок 2.6 – К определению третьего уравнения Максвелла

Физический смысл – если существуют заряды, то они возбуждают потенциальное электрическое поле.

Применяя теорему Остроградского-Гаусса

$$\oint_S \bar{v} d\bar{S} = \int_V \text{div} \bar{v} d\bar{V} \quad (2.27)$$

к левой части уравнения (2.25) и приравнивая подынтегральное выражение, получаем третье уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\text{div} \bar{D} = \rho \quad (2.28)$$

Физический смысл – источник вектора - свободные заряды.

Закон Гаусса строго доказывается только для электростатических полей. Максвелл постулировал его справедливость для произвольных сред, любых зарядов и полей, как угодно изменяющихся во времени и пространстве.

Четвертое уравнение Максвелла в интегральной форме совпадает с законом Гаусса для магнитного поля, согласно которому, поток вектора \vec{B} через любую замкнутую поверхность S равен нулю (рисунок 2.7).

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (2.29)$$

Равенство нуля потока вектора \vec{B} через любую замкнутую поверхность показывает, что линии вектора \vec{B} непрерывны и не имеют ни начала, ни конца. Они либо замкнуты, либо уходят в бесконечность.

Физический смысл – в природе отсутствуют магнитные заряды.

Уравнение (2.29) читается так: поток вектора магнитной индукции \vec{B} через замкнутую поверхность равен нулю.

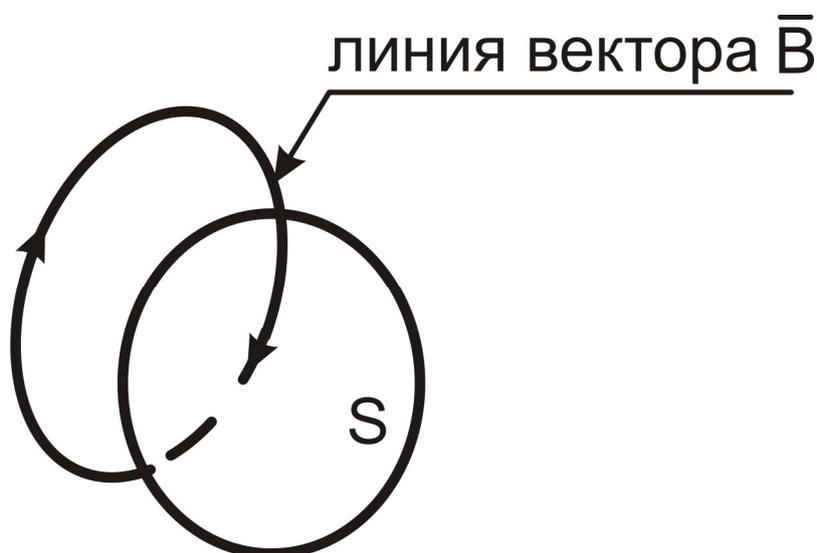


Рисунок 2.7 – К определению четвертого уравнения Максвелла

Используя теорему Остроградского-Гаусса, получаем четвертое уравнение Максвелла в дифференциальной форме

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.30)$$

Для того, чтобы облегчить определение поля внутри областей, обтекаемых токами, вводят векторный магнитный потенциал \vec{A} , который определяется из условия, чтобы его интеграл по любому замкнутому пути был равен полному потоку, охватываемому этим путем. Если площадь охватываемой путем поверхности, стремиться к нулю, то предельное значение интеграла $\text{rot} \vec{A}$, отнесенное к единице площади, равно магнитной индукции \vec{B} . Следовательно,

$$\text{rot} \vec{A} = \vec{B} \quad (2.31)$$

Вектор \bar{A} лежит в плоскости, перпендикулярной направлению вектора B . Уравнение 2.31 определяет только производную A , а для полного определения векторного потенциала необходимо также знать его дивергенцию.

Для любого рассматриваемого двумерного поля вектор A расположен в плоскости, перпендикулярной направлению потока и, следовательно, параллелен направлению тока. Отсюда, поскольку изменение A между двумя магнитными линиями равно потоку между этими линиями на единицу длины в направлении тока, A обладает свойствами функции потока, а линии, соединяющие точки с одинаковыми значениями A , являются магнитными линиями.

2.1.5 Уравнения Максвелла в комплексной форме

Все реальные электромагнитные процессы можно представить либо в виде суммы дискретных гармонических колебаний, либо в виде непрерывного спектра гармонических колебаний, поэтому изучение гармонических во времени электромагнитных полей представляет большой практический и теоретический интерес. Такие поля часто называют монохроматическими. В буквальном переводе монохроматический означает одноцветный. Название взято из оптики: как известно, каждому цвету соответствуют колебания определенной частоты.

При исследовании процессов, гармонически изменяющихся во времени, весьма удобным математическим аппаратом является, символический метод или метод комплексных амплитуд, известных из теории электрических цепей [124]. Согласно этой теории, любой гармонически изменяющейся функции

$$\bar{A} = \bar{A}_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2.32)$$

где A_m – амплитуда;

φ – начальная фаза;

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T;$$

f и T – частота и период гармонического колебания;

можно поставить в соответствие комплексный вектор

$$\bar{A} = \bar{A}_m \cdot e^{i(\omega \cdot t + \varphi)} = \bar{A}_m \cdot e^{i \cdot \varphi}, \quad (2.33)$$

где $\bar{A}_m = A_m \cdot e^{i \cdot \varphi}$ – не зависящий от времени комплексный вектор, модуль и аргумент которого, являясь функциями пространственных координат $[\bar{A}_m = A_m \cdot (x, y, z); \varphi = \varphi \cdot (x, y, z)]$ и показывают как из-

меняются в пространстве амплитуда и фаза гармонически изменяющейся величины (по аналогии $A_m = A_m \cdot e^{i\varphi}$ - комплексная амплитуда скалярной функции A).

Как известно по формуле Эйлера:

$$\bar{A}_m \cdot e^{i(\omega \cdot t + \varphi)} = \bar{A}_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) + i\bar{A}_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2.34)$$

следовательно, для перехода от комплексной амплитуды \bar{A}_m к мгновенному значению исходной функции нужно вычислить реальную часть $\bar{A} = \text{Re}\{\bar{A}\}$.

Необходимо отметить, что, в общем случае, вместо разложения вектора A по ортам декартовой системы координат может оказаться необходимым разложение по каким-либо другим ортогональным векторам, что не вносит в рассмотрение никаких принципиальных изменений. Если функция A удовлетворяет линейным уравнениям, то таким же уравнениям будут удовлетворять соответствующие комплексные функции A . Однако, определение комплексных функций во многих случаях оказывается проще определения исходных функций.

Уравнения Максвелла являются линейными дифференциальными уравнениями. Поэтому при изучении монохроматических электромагнитных полей можно вместо векторов \vec{E} и \vec{H} рассматривать комплексные векторы $\dot{\vec{E}}$ и $\dot{\vec{H}}$.

И, таким образом, имея запись уравнений Максвелла в форме, позволяющей вычислить комплексные амплитуды вектора \vec{E} и \vec{H} легко получить и их мгновенные значения (\bar{E}_m, \bar{H}_m) .

Для комплексной записи первого уравнения Максвелла в комплексной форме вычислим производную

$$\frac{\partial \dot{\vec{D}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\dot{\vec{D}}_m e^{i\omega t}) = i\omega \dot{\vec{D}}_m e^{i\omega t}. \quad (2.35)$$

Тогда первое уравнение Максвелла в комплексной форме будет иметь вид

$$\text{rot} \dot{\vec{H}}_m e^{i\omega t} = \bar{j}_{npm} e^{i\omega t} + i\omega \dot{\vec{D}}_m e^{i\omega t}. \quad (2.36)$$

Используя уравнение связи $\dot{\vec{D}}_m = \tilde{\varepsilon}_a \dot{\vec{E}}_m$ и закон Ома $\bar{j}_{npm} = \sigma \dot{\vec{E}}_m$, а также разделив обе части уравнения на $e^{i\omega t}$, получим

$$\text{rot} \dot{\vec{H}}_m = \sigma \dot{\vec{E}}_m + i\omega \varepsilon_a \dot{\vec{E}}_m, \quad (2.37)$$

или после преобразования

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}}_m = i\omega \dot{\vec{E}}_m \left(\varepsilon_a - i \frac{\sigma}{\omega} \right) = i\omega \tilde{\varepsilon}_{ak} \dot{\vec{E}}_m, \quad (2.38)$$

где $\tilde{\varepsilon}_{ak} = \varepsilon_a - i \frac{\sigma}{\omega}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Проделав аналогичные преобразования в остальных уравнениях, получим *систему уравнений Максвелла в комплексной форме*

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\vec{H}}_m &= i\omega \tilde{\varepsilon}_{ak} \dot{\vec{E}}_m \\ \operatorname{rot} \dot{\vec{E}}_m &= -i\omega \tilde{\mu}_{ak} \dot{\vec{H}}_m \\ \operatorname{div} \varepsilon_a \dot{\vec{E}}_m &= \dot{\rho}_m \\ \operatorname{div} \mu_a \dot{\vec{H}}_m &= 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Следует иметь ввиду то, что возможность использования в данном случае метода комплексных амплитуд обусловлена линейностью уравнений Максвелла. Линейность же позволяет использовать этот метод и при анализе сложных негармонических функций. Естественно, при этом предварительно представить данную функцию в виде спектра (дискретного или непрерывного) гармонических функций, с последующим применением принципа суперпозиции.

2.1.6 Классификация сред по проводимости

Рассмотрим более подробно первое уравнение Максвелла в комплексной форме

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}}_m = j\omega \left(\varepsilon_a - i \frac{\sigma}{\omega} \right) \dot{\vec{E}}_m, \quad (2.40)$$

очевидно, что сомножитель, стоящий в скобках зависит от параметров среды - диэлектрической проницаемости, проводимости и частоты электрического поля, кроме того, очевидно, что диэлектрическая проницаемость определяет величину плотности тока смещения в среде:

$$\dot{J}_{см} = \omega \varepsilon \dot{\vec{E}}_m, \quad (2.41)$$

а проводимость - плотность тока проводимости

$$J_{np} = \sigma \dot{\vec{E}}_m \quad (2.42)$$

Соответственно величина $tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ определяет отношение плотности тока проводимости к плотности тока смещения в среде с параметрами σ и ε на частоте ω .

При этом в электродинамике принято считать, что в случае:

если $tg\delta > 10$ – среда является **проводником** – (токи проводимости \gg токов смещения);

если $tg\delta < 0,1$ – среда является **диэлектриком**;

если $0,1 < tg\delta < 10$ – среда **полупроводник**.

Необходимо обратить внимание, что классификация среды зависит от частоты и при разных частотах одна и та же среда может быть как проводник, так и полупроводник или диэлектриком.

Например, почва: $\varepsilon_{отн} = 10$, $\delta = 10^{-2}$.

$f < 2$ МГц – проводник;

$f > 200$ МГц – диэлектрик;

$2 < f < 200$ МГц – полупроводник.

2.1.7 Классификация электромагнитных полей

Решение уравнений Максвелла является достаточно сложной задачей, однако, для некоторых полей она может быть упрощена, соответственно, упрощаются и уравнения Максвелла.

Статическое поле (электростатическое и магнитостатическое) – поле неподвижных, неизменяющихся во времени зарядов $\frac{\partial}{\partial t} = 0$,

$$\begin{array}{ll}
 \bar{J}_{np} = 0 & \bar{J}_{cm} = 0 \\
 rot\bar{H} = 0 & \oint_L \bar{H}d\bar{l} = 0 \\
 rot\bar{E} = 0 & \oint_L \bar{E}d\bar{l} = 0 \\
 div\bar{D} = \rho & \oint_S \bar{D}d\bar{S} = Q \\
 div\bar{B} = 0 & \oint_S \bar{B}d\bar{S} = 0
 \end{array} \quad (2.43)$$

Стационарное поле – поле, создаваемое постоянными токами.

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \Rightarrow \bar{J}_{cm} = 0 \quad \bar{J}_{np} \neq 0$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{j}_{np} = \sigma \bar{E} & \oint_L \bar{H} d\bar{l} &= \bar{I}_{np} \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= 0 & \oint_L \bar{E} d\bar{l} &= 0 \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho & \oint_S \bar{D} d\bar{S} &= Q \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0 & \oint_S \bar{B} d\bar{S} &= 0 \end{aligned} \quad (2.44)$$

Квазистационарное поле – (медленно изменяющееся во времени)
($v \ll \lambda$)

при этом $\sigma \bar{E} \gg \frac{d\bar{D}}{dt}$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J}_{np}, \quad \text{если } \bar{J}_{np} = 0, \text{ то } \operatorname{rot} \bar{H} = \frac{d\bar{D}}{dt} \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{d\bar{B}}{dt}; \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho; \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Быстроперменное поле – описывается полной системой уравнений Максвелла.

2.2 ЦЕПНОЙ МЕТОД РАСЧЕТА

2.2.1 Основные допущения, принимаемые при расчете магнитных цепей

В современных электрических машинах, трансформаторах, электромагнитных реле, а также в различных измерительных приборах для увеличения магнитного потока используют ферромагнитные сердечники, обладающие магнитной проницаемостью большей по сравнению с проницаемостью воздуха. В связи с этим оказывается возможным сделать некоторые допущения, позволяющие исключить необходимость расчета пространственного распределения характеристик поля.

Перечисленные выше устройства обычно состоят из ферромагнитных сердечников и обмоток, изготавливаемых из изолированных проводников и надеваемых на эти сердечники и образующих ту или иную магнитную цепь [140]. В этом случае расчет магнитной цепи базируется на следующих допущениях.

1. Магнитная проницаемость ферромагнетиков, из которых изготавливаются сердечники магнитной цепи, много больше проницаемости окружающей среды. Это позволяет считать, что с любым витком одной и той же катушки сцеплен один и тот же поток Φ и что на каждом участке магнитной цепи с неизменным поперечным сечением сердечника он остается одним и тем же. А это означает, что в данном случае можно пренебречь потоками рассеяния, замыкающимися как по участкам магнитной цепи, так и в окружающем пространстве.

2. Предполагается, что поперечные размеры ферромагнитных сердечников магнитной цепи малы по сравнению с их длиной. Это позволяет принимать за длину сердечника длину его средней линии, а поле внутри сердечника считать однородным. Тогда падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи ab (рисунок 2.10) с постоянным сечением можно вычислить следующим образом:

$$U_M = \int_a^b \bar{H} \cdot d\bar{l} \approx H_{ab} \cdot l_{ab},$$

где H_{ab} – напряженность магнитного поля на участке ab ;

l_{ab} – длина средней линии участка.

3. Предполагается также, что воздушные зазоры между отдельными участками магнитной цепи достаточно малы по сравнению с поперечными размерами сердечников и длиной силовой линии. Это позволяет считать, что в воздушном промежутке магнитное поле остается однородным, а падение магнитного напряжения на нем можно определить следующим образом:

$$U_m = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot l_g,$$

где l_g – длина воздушного промежутка магнитной цепи;

$B_g = \frac{\Phi}{S}$ – индукция магнитного поля в воздушном зазоре;

Φ – магнитный поток сердечника;

S – площадь поперечного сечения полюса сердечника;

μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме.

В магнитных цепях из магнито-мягких материалов зависимость индукции в сердечнике от напряженности магнитного поля принято определять основной кривой намагничивания.

При указанных выше допущениях на основании фундаментального закона магнитостатики – закона полного тока и принципа непрерывности линий вектора индукции магнитного поля получают уравнения для магнитных цепей, аналогичные по форме уравнениям электрических цепей:

а) закон Ома для участка линейной цепи

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m};$$

б) первый закон Кирхгофа для узлов магнитной цепи

$$\sum_1^m \Phi_i = 0;$$

в) второй закон Кирхгофа для любого замкнутого контура магнитной цепи

$$\sum F_i = \sum I_i w_i = \sum U_{Mi} = \sum H_i l_i$$

где $F_i = I_i w_i$ – намагничивающая сила.

Поэтому для расчета магнитных цепей могут быть использованы такие же методы, которые применяются и для расчета электрических цепей.

2.2.2 Расчет неразветвленных магнитных цепей

При расчете неразветвленных магнитных цепей приходится встречаться с двумя видами задач («прямая» и «обратная» задачи).

В «прямой» задаче необходимо определить намагничивающий ток или намагничивающую силу по заданному магнитному потоку, а в «обратной» – поток по заданной величине намагничивающей силы. В обоих случаях, как правило, известны геометрические размеры всех участков магнитной цепи, материалы, из которых они изготовлены, основные кривые намагничивания или петли гистерезиса и числа витков катушек.

Рассмотрим неразветвленную магнитную цепь (рисунок 2.8), со-

стоящую из П-образного сердечника электромагнита и стальной пластины, замыкающей его концы. Между концами сердечника электромагнита и пластиной имеется воздушный зазор l_g . Размеры сердечника электромагнита и пластины, а также материалы, из которых они изготовлены, известны. Необходимо определить намагничивающий ток, при котором магнитный поток Φ в воздушном зазоре имеет заданное значение. Сечение сердечника электромагнита во всех частях одинаково и равно S_1 , а сечение пластины – S_2 .

При этих условиях всю магнитную цепь представим в виде трех последовательно соединенных участков: сердечника электромагнита, двух воздушных зазоров и стальной пластины с одинаковым потоком Φ . Для расчета магнитной цепи наметим среднюю магнитную линию и определим длины ее отдельных участков l_1 , $2l_g$ и l_2 .

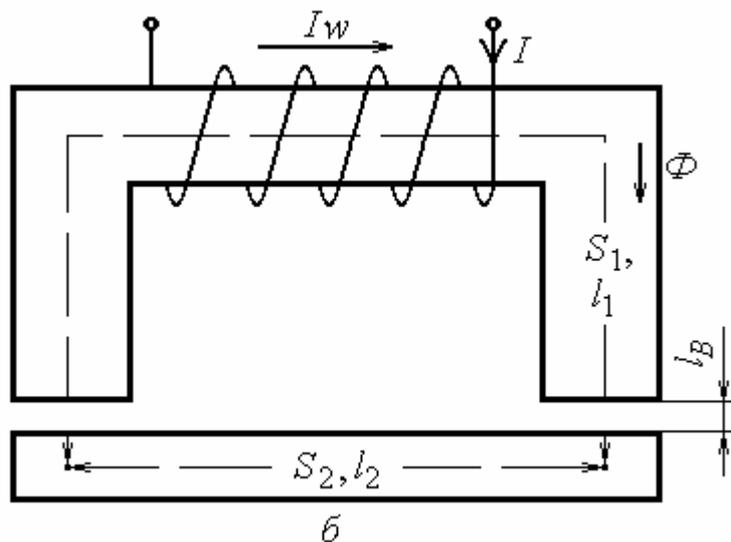


Рисунок 2.8 – Неразветвленная магнитная цепь

Неразветвленную магнитную цепь, изображенную на рисунке 2.8, заменим эквивалентной схемой (рисунок 2.9), составленной из трех последовательно соединенных сопротивлений: R_{M1} , R_{MB} и R_{M2} и НС $Iw = F$. В этой схеме сопротивления R_{M1} и R_{M2} зависят от магнитного потока, а сопротивление R_{MB} является величиной постоянной.

По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи намагничивающая сила будет определяться выражением

$$F = Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_B 2l_B.$$

Магнитные индукции определим по заданному значению магнитного потока как

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}; \quad B_B = \frac{\Phi}{S_1}.$$

По найденным значениям магнитных индукций B_1 , B_2 и основным кривым намагничивания для соответствующих материалов определим напряженности магнитного поля H_1 и H_2 .

Для воздушного зазора $H_B = B_B/\mu_0$, тогда намагничивающий ток

$$I = \frac{Iw}{w} = \frac{H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_B 2l_B}{w}.$$

Рассмотрим теперь ту же магнитную цепь (рисунок 2.8), для которой требуется определить магнитный поток по заданному значению намагничивающей силы («обратная» задача). Эта задача, в отличие от предыдущей не имеет «прямого» решения вследствие нелинейной связи между потоком и намагничивающим током.

Решение такой задачи можно выполнить, например, следующим методом. Сначала зададимся предполагаемым значением магнитного потока, например Φ' , затем, также, как и в предыдущей «прямой» задаче, найдем НС $F' = I'w = \Sigma(Hl)'$. Если полученное значение намагничивающей силы совпадает с заданным, т.е. $F = Iw$, то задача решена. Однако такого совпадения после первой попытки обычно не получается. Поэтому следует задаться другими значениями магнитного потока: Φ'' , Φ''' и т.д., найти соответствующие значения намагничивающих сил ($F'' = I''w$, $F''' = I'''w$) и т.д. и построить вспомогательную характеристику $\Phi = f(\Sigma Hl)$ (рисунок 2.10).

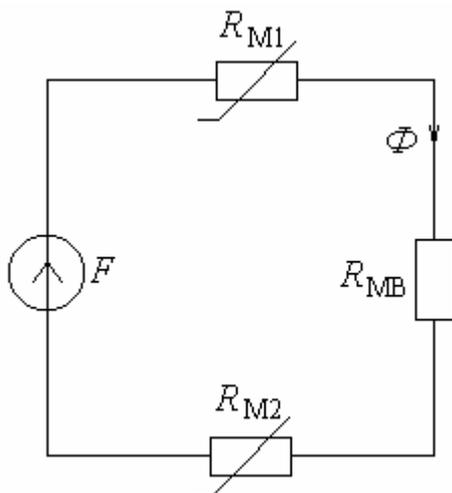


Рисунок 2.9 – Эквивалентная схема неразветвленной магнитной цепи

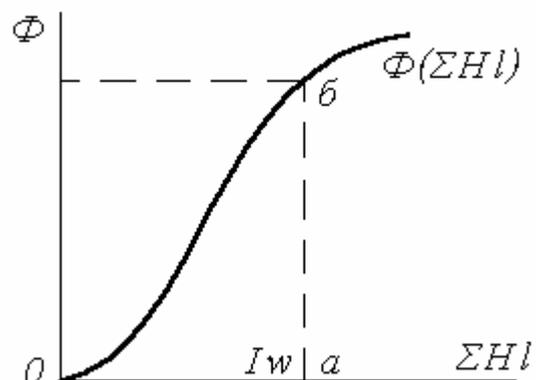


Рисунок 2.10 – Вспомогательная характеристика

Отложив на оси абсцисс величину заданной намагничивающей силы $F = Iw$ (рисунок 2.10) получим точку a , проведем из этой точки прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривой $\Phi(\Sigma Hl)$ в точке b . В результате получим отрезок $a-b$, определяющий искомое значение магнитного потока.

Так как магнитный поток во всех участках неразветвленной магнитной цепи один и тот же, то характеристика $\Phi(\Sigma Hl)$ может быть построена по аналогии с неразветвленной электрической цепью графическим суммированием абсцисс прямой $\Phi(H_B 2l_B)$ и кривых $\Phi(H_1 l_1)$ и $\Phi(H_2 l_2)$ для одних и тех же значений магнитного потока.

Характеристика $\Phi(H_B 2l_B)$ – это прямая, проходящая через начало координат. Ее легко построить, если найти напряженность магнитного поля H_B для какого-нибудь значения Φ :

$$H_B = \frac{\Phi}{\mu_0 S_B}.$$

Характеристики $\Phi(H_1 l_1)$ и $\Phi(H_2 l_2)$ строятся при помощи основных кривых намагничивания для материалов первого и второго участков магнитной цепи. Для этого нужно умножить ординаты кривых намагничивания соответственно на сечения первого и второго участков ($\Phi = BS$), а абсциссы – на их длины (Hl).

2.2.3 Расчет разветвленных магнитных цепей

Расчеты разветвленных магнитных цепей основаны на применении законов Кирхгофа для магнитных цепей. Вследствие нелинейной связи между индукцией и напряженностью магнитного поля расчет магнитных цепей обычно ведется графоаналитическими методами аналогично методам расчета нелинейных электрических цепей.

При расчете магнитной цепи, прежде всего, нужно указать на схеме направления намагничивающих сил, если известны направления токов и расположение обмоток, или произвольно выбрать положительные направления намагничивающих сил, если они являются искомыми. Затем необходимо выбрать положительные направления магнитных потоков, после чего можно переходить к составлению эквивалентной схемы и ее расчету.

Пример разветвленной магнитной цепи с одной намагничивающей силой приведен на рисунке 2.11. На рисунке 2.12 показана эквивалентная схема этой магнитной цепи. Для такой магнитной цепи возможен «прямой» расчет, если требуется определить намагничивающую силу по заданному значению потока в воздушном зазоре Φ_3 .

По известному потоку Φ_3 вычислим индукцию

$$B_3 = \Phi_3 / S_3,$$

по кривой намагничивания найдем напряженность магнитного поля H_3 и напряженность поля в воздушном зазоре по формуле

$$H_B = B_B / \mu_0 = \Phi_3 / (\mu_0 S_B)$$

Магнитное напряжение третьей ветви, т.е. между узлами «а» и «б»,

$$U_{Ma\bar{b}} = \sum Hl = H_3(l'_3 + l''_3) + H_B l_B.$$

Так как вторая и третья ветви соединены параллельно, то и

$$H_2 l_2 = U_{Ma\bar{b}}.$$

Вычислим $H_2 = U_{Ma\bar{b}} / l_2$, по кривой намагничивания найдем B_2 .

Поток Φ_2 по формуле

$$\Phi_2 = B_2 S_2,$$

а поток Φ_1 по формуле

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

Определив поток Φ_1 , вычислим магнитную индукцию

$$B_1 = \Phi_1 / S_1$$

и по кривой намагничивания найдем напряженность магнитного поля H_1 .

По второму закону Кирхгофа искомая намагничивающая сила определится выражением

$$F = Iw = H_1 l_1 + U_{Ma\bar{b}}.$$

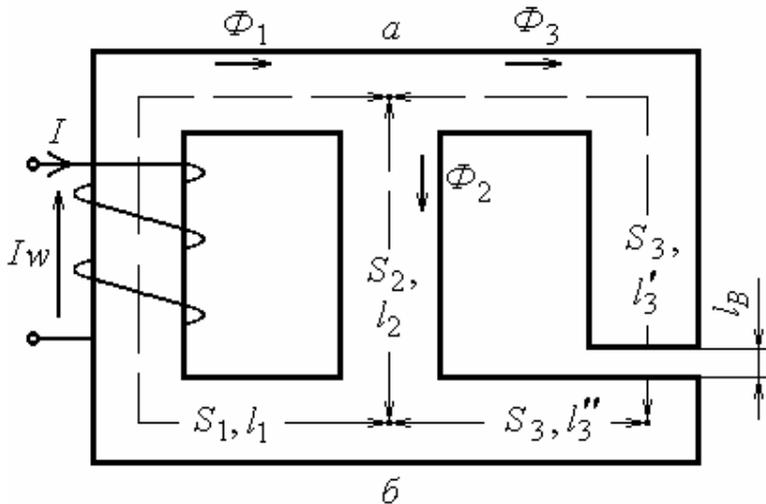


Рисунок 2.11 – Разветвленная магнитная цепь

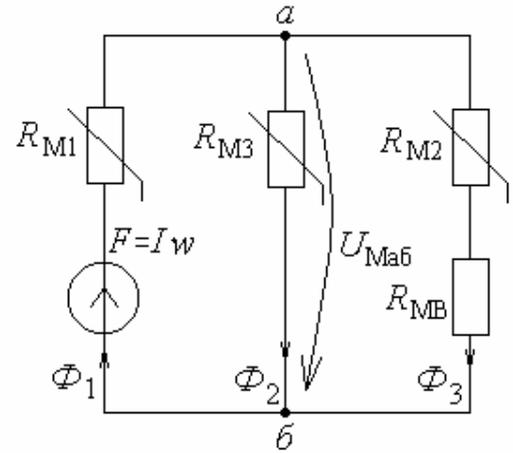


Рисунок 2.12 – Эквивалентная схема разветвленной магнитной цепи

Рассмотрим порядок решения «обратной» задачи. Необходимо вычислить потоки в ветвях магнитной цепи (рисунок 2.11) по заданной намагничивающей силе. Задача может быть решена графическим методом аналогично расчету цепи постоянного тока с нелинейными элементами.

Для решения задачи при помощи кривых намагничивания построим кривую $\Phi_2(U_{Маб}) = \Phi_2(H_2 l_2)$ (рисунок 2.13) и зависимость $\Phi_3(U_{Маб}) = \Phi_3(H_B l_B + H_3 l_3)$ путем суммирования ординат прямой $\Phi_3(H_B l_B)$ и кривой $\Phi_3(H_3 l_3)$ (где $l_3 = l'_3 + l''_3$) для одних и тех же значений магнитного потока Φ_3 . Суммированием ординат кривых $\Phi_2(U_{Маб})$ и $\Phi_3(U_{Маб})$ для одних и тех же значений магнитного напряжения $U_{Маб}$ получим кривую $(\Phi_2 + \Phi_3) = f(U_{Маб})$.

Выполненные построения эквивалентны замене двух параллельных ветвей с сопротивлениями R_{M2} и $R_{M3} + R_{MB}$ (рисунок 2.12) одним нелинейным сопротивлением, характеристикой которого и является кривая $(\Phi_2 + \Phi_3) = f(U_{Маб})$.

Дальнейшие построения для полученной неразветвленной цепи можно выполнить построением характеристики $\Phi_1 = f(Iw - H_1 l_1) = \Phi_1(U_{Маб})$ (рисунок 2.13). Точка m_1 пересечения кривой $\Phi_1(U_{Маб})$ с кривой $(\Phi_2 + \Phi_3) = f(U_{Маб})$ определяет магнитное напряжение $U_{Маб}$ между точками a и b и поток Φ_1 . Ординаты точек пересечения m_2 и m_3 вертикальной прямой $m_1 - m$ с кривыми $\Phi_2(U_{Маб})$ и $\Phi_3(U_{Маб})$ дают соответственно пото-

ки Φ_2 и Φ_3 .

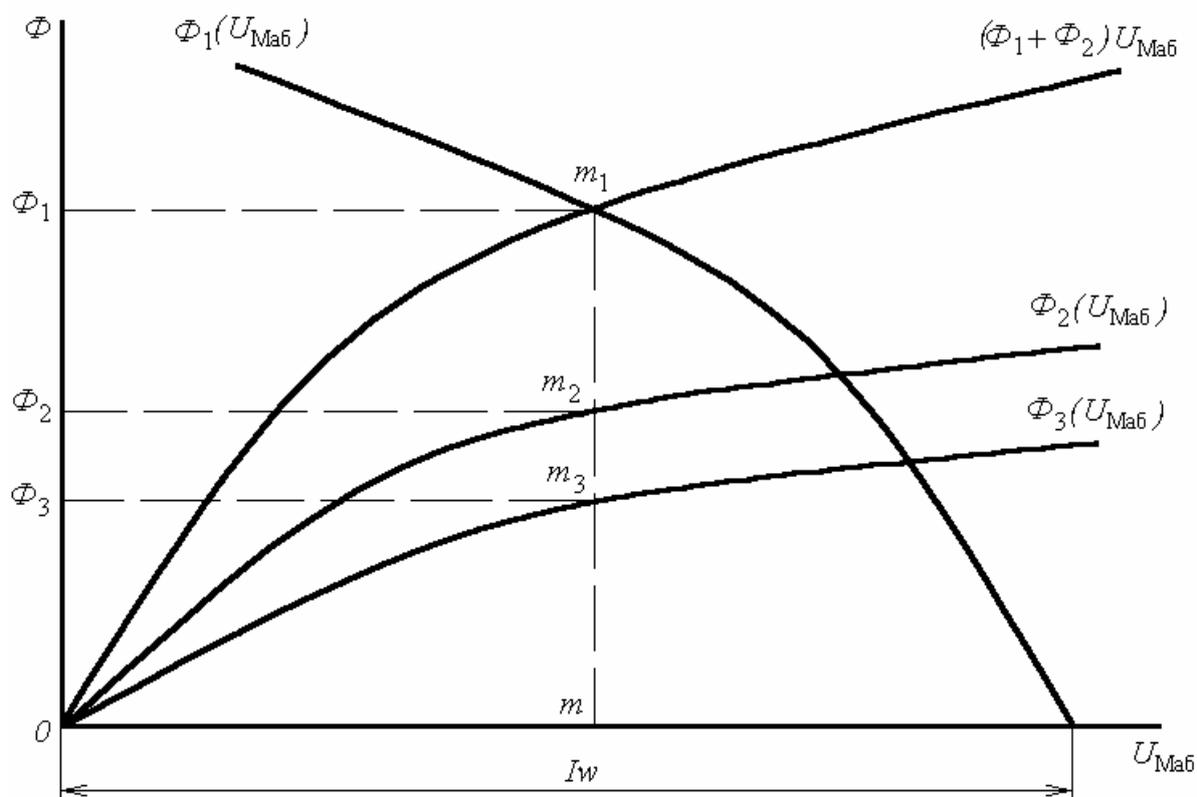


Рисунок 2.13 – Вспомогательная характеристика

2.3 МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Методы конечных разностей, которые ведут начало от Гаусса, но получили широкое распространение лишь с 1940 г., могут быть использованы для получения численных решений с любой требуемой степенью точности всех задач при расчете электромагнитных полей. Кроме того, хотя некоторые теоретические обоснования этих методов очень сложны, их практическое применение чрезвычайно просто и фактически сводится к простым арифметическим операциям. Главный недостаток методов конечных разностей заключается в том, что (как и для всех численных методов) решение должно повторяться для каждой совокупности параметров, задаваемых в задаче.

Решения, полученные методом конечных разностей, представляют собой совокупность значений описывающей поле функции в дискретных точках, равномерно распределенных по всей области поля. Эти значения находятся путем замены одного описывающего поле дифференциального уравнения с частными производными системой простых уравнений в конечных разностях, которые имеют вид линейных уравнений, связывающих значение потенциала в каждой точке со значениями потенциала в других точках, окружающих ее. Таким образом, определение поля сводится к решению системы совместных уравнений. В связи с тем, что при решении задачи приходится оперировать с большим числом таких уравнений, применение методов исключения переменных, определителей и обращения матриц становится нецелесообразным. Вместо этого должны использоваться специальные методы. Релаксационный метод предназначен для расчетов вручную и является чрезвычайно универсальным, хотя его эффективность зависит от опыта и искусства расчетчика. В противоположность этому другой метод, итерационный, основан на полностью повторяющемся цикле операций и идеально подходит для выполнения расчетов с использованием компьютерной техники, прогресс которой в последние годы значительно содействовал развитию этого метода.

Уравнения в конечных разностях получены применительно к уравнению Пуассона для векторного потенциала; при переходе к уравнению Лапласа плотность тока принимается равной нулю. Естественно, уравнения в конечных разностях имеют одинаковый вид независимо от того, составлены ли они для векторного потенциала A , скалярного потенциала ψ или функции потока φ .

При замене уравнения поля системой уравнений в конечных разностях, связывающих значения потенциальной функции в дискретных точках, можно выбрать произвольное пространственное распределение точек. Однако очевидно, что при выборе полностью равномерного распределения точек для каждой из них справедливо уравнение в конечных разности

стях одного и того же вида и формулировка задачи значительно упрощается. Требуемое распределение обеспечивается расположением точек в «узлах» любой равномерной сетки. Эта сетка состоит из квадратов и изображена на рисунке 2.14, для простой, квадратной, области поля. Нетрудно заметить, что положение любого узла, лежащего во внутренней области границы, по отношению к соседним узлам характеризуется приведенной на рисунке 2.15 схемой. Это типовое расположение узлов носит название симметричной звезды.

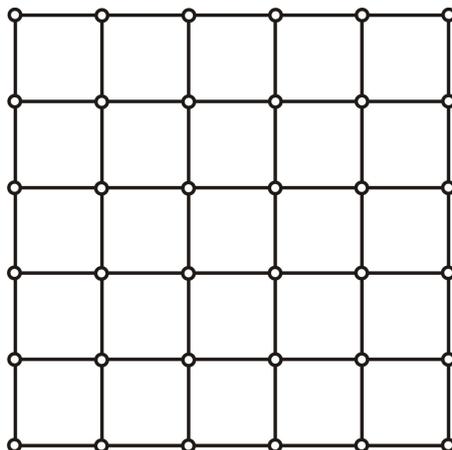


Рисунок 2.14 – Распределение квадратной равномерной сетки

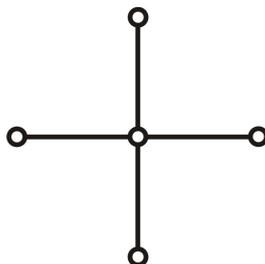


Рисунок 2.15 – Звезда симметричной сетки

Существуют еще и другие равномерные сетки: равносторонняя треугольная сетка, изображенная на рисунке 2.16, и правильная шестиугольная сетка, показанная на рисунке 2.17.

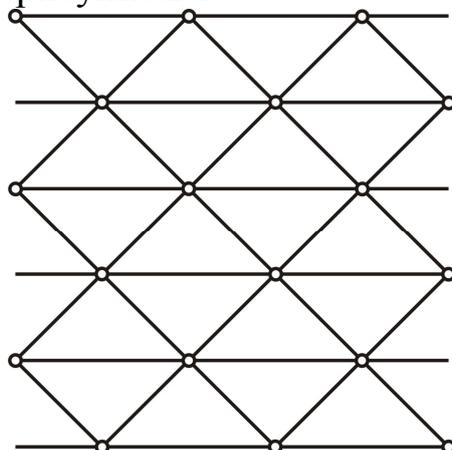


Рисунок 2.16 – Распределение треугольной равномерной сетки

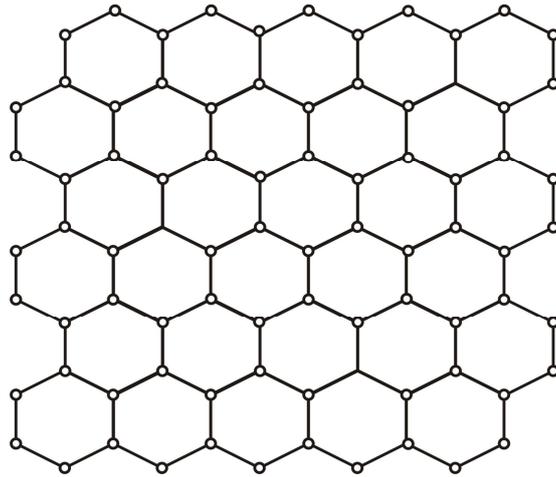


Рисунок 2.17 – Распределение шестиугольной равномерной сетки

При расчета используется также неравномерная и полярная сетки. Она имеет преимущества для некоторых задач с круговыми границами.

Симметричная звезда (рисунок 2.18-б) относится ко всем узлам сетки, за исключением узлов, которые находятся в непосредственной близости к границе, в тех случаях, когда граница и линии сетки не совпадают. Для узла, находящегося в непосредственной близости к такой границе, типовое расположение соседних узлов характеризуется асимметричной звездой, изображенной на рисунке 2.18-а. Уравнение в конечных разностях для потенциала в «центральном» узле θ отличается от уравнения для центрального узла симметричной звезды, однако поскольку симметричная звезда является частным случаем асимметричной, рассмотрим только асимметричную звезду.

Предположим, что сторона квадрата сетки h , называемая размером ячейки сетки, мала по сравнению с размерами границ, и примем одинаковую нумерацию узлов для обеих звезд, как показано на рисунке 2.18.

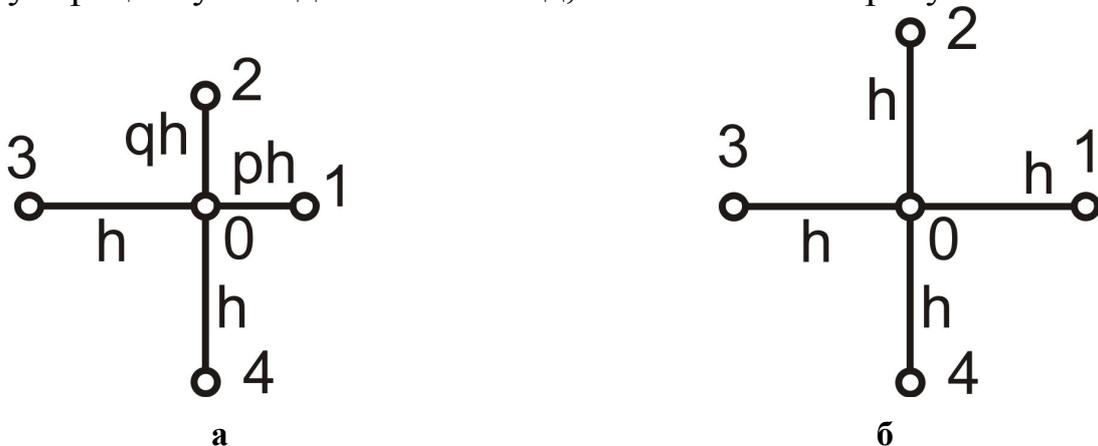


Рисунок 2.18 – Звезда асимметричной (а) и симметричной (б) сетки

В случае асимметричной звезды допустим, что узлы 1 и 2 расположены на расстояниях ph и qh от узла θ , где p и q – числа, меньшие едини-

цы. При решении практических задач это означает, что узлы 1 и 2 будут лежать на границе.

Уравнение в конечных разностях получается в результате разложения потенциала узла 0 в ряд Тейлора и нахождения выражений для $(\partial^2 A/\partial x^2)_0$ и $(\partial^2 A/\partial y^2)_0$, которые вводятся в уравнение Пуассона.

Значение потенциала A в любой точке x , лежащей на линии, проведенной через узел 0 параллельно оси x , может быть выражено через значение потенциала узла 0, равное A_0 , с помощью ряда Тейлора:

$$A = A_0 + \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_0 (x - x_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_0 (x - x_0)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3 A}{\partial x^3}\right)_0 (x - x_0)^3 + \dots \quad (2.46)$$

Подстановка в это уравнение значений $x = x_0 + ph$ и $x = x_0 - h$ дает значения потенциала соответственно в узлах 1 и 3:

$$A_1 = A_0 + ph \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_0 + \frac{1}{2!} p^2 h^2 \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_0 + \frac{1}{3!} p^3 h^3 \left(\frac{\partial^3 A}{\partial x^3}\right)_0 + \dots \quad (2.47)$$

$$A_3 = A_0 + h \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_0 + \frac{1}{2!} h^2 \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_0 + \frac{1}{3!} h^3 \left(\frac{\partial^3 A}{\partial x^3}\right)_0 + \dots \quad (2.48)$$

Суммировав (2.47) и (2.48) после умножения последнего на p , получим:

$$A_1 + pA_3 = (1 + p)A_0 + \frac{1}{2!} ph^2(1 + p) \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_0 - \frac{1}{3!} ph^3(1 - p^2) \left(\frac{\partial^3 A}{\partial x^3}\right)_0 + \dots \quad (2.49)$$

и, пренебрегая членами, содержащими A в третьей и более высоких степенях, что допустимо, если h мало, приходим к простому выражению для $(\partial^2 A/\partial x^2)_0$:

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right)_0 = \frac{2A_1}{p(1 + p)} + \frac{2A_3}{(1 + p)} - \frac{2A_0}{p} \quad (2.50)$$

Аналогичным образом можно получить выражение для $(\partial^2 A/\partial y^2)_0$:

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right)_0 = \frac{2A_2}{q(1 + q)} + \frac{2A_4}{(1 + q)} - \frac{2A_0}{q} \quad (2.51)$$

Далее подстановка найденных значений $(\partial^2 A/\partial x^2)_0$ и $(\partial^2 A/\partial y^2)_0$ в уравнение Пуассона, где для более компактной записи член $\mu\mu_0 J$ заменен W , дает:

$$2 \left[\frac{A_1}{p(1 + p)} + \frac{A_2}{q(1 + q)} + \frac{A_3}{(1 + p)} + \frac{A_4}{(1 + q)} - \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} \right) A_0 \right] + h^2 W = 0 \quad (2.52)$$

Это уравнение (при небольшом значении h) является хорошей аппроксимацией уравнения Пуассона и может его заменить. Однако, необходимо подчеркнуть, что в то время как дифференциальное уравнение относится к любой точке поля, каждое уравнение в конечных разностях

Обозначим узлы на границе номерами со штрихом от 1 до 16, а внутренние узлы номерами от 1 до 9. Значения W и потенциала на границе $A'_1 - A'_{16}$ заданы и на первом этапе решения требуется определить значения потенциала $A_1 - A_9$ для внутренних узлов. Это нетрудно сделать, применив уравнение (2.53) для каждого из внутренних узлов. Для внутреннего узла 1 имеем:

$$A_6 + A_2 + A'_2 + A'_{16} - 4A_1 + h^2W = 0,$$

для узла 2

$$A_5 + A_3 + A'_3 + A_1 - 4A_2 + h^2W = 0.$$

Аналогичные уравнения могут быть составлены и для узлов 3-9. Следовательно, девять значений потенциала связаны между собой и с граничными условиями девятью линейными уравнениями и их можно найти в результате совместного решения этих уравнений.

Точно так же любую задачу по определению поля можно свести к решению системы совместных линейных уравнений в конечных разностях. Для задач с криволинейными границами или с границами, по каким-либо другим причинам не совпадающими с узлами сетки, единственное отличие в формулировке по сравнению с простым случаем, рассмотренным выше, заключается в том, что уравнения для узлов, примыкающих к границе, должны быть выведены из общего уравнения в конечных разностях (2.52) (при $W=0$ для областей лапласова поля).

Прежде чем приступить к рассмотрению способов решения совместных уравнений для последующего анализа необходимо представить их в матричном виде. Короче говоря, если $[M]$ – матрица коэффициентов при неизвестных потенциалах A_n , $[u]$ – столбцовая матрица неизвестных потенциалов, а $[v]$ – столбцовая матрица сумм известных потенциалов A'_n и постоянных членов h^2W (когда они присутствуют), то указанные уравнения могут быть представлены в виде:

$$[M][u] = [v]. \quad (2.55)$$

Заметим, что вид матрицы $[M]$ зависит только от пространственного распределения узлов поля, но не зависит от того, является ли поле лапласовым или пуассоновым.

В отношении решения этих уравнений следует отметить две важные особенности. Во-первых, в любой практической задаче число уравнений очень велико (цифра 1 000 является вполне обычной) и, во-вторых, число членов в каждом из уравнений очень мало. Первая из этих особенностей приводит к тому, что обычные методы нахождения точных решений становятся совершенно неприемлемыми просто в связи с чрезмерной длительностью вычислений. Так, например, для решения 100 уравнений методом исключения переменных (который гораздо быстрее метода определителей) потребуется, по крайней мере, 10 000 ч при выполнении расчетов

вручную, поэтому необходимо использовать компьютерную технику. Однако, к счастью, благодаря малому числу членов в уравнениях можно применить два значительно более быстрых численных метода. Это тесно связанные релаксационный и итерационный методы, основанные на процессе последовательных приближений. В качестве характеристики скорости этих методов можно указать, что 100 уравнений в конечных разностях могут быть решены с точностью 0,1 % примерно за 8 часов вручную (релаксационным методом) и примерно за 1 мин при использовании вычислительной машины (итерационным методом). Дополнительное преимущество этих методов состоит в том, что продолжительность расчетов тесно связана с получаемой точностью, поэтому можно прервать расчет, когда будет достигнута требуемая точность.

Релаксационный метод решения совместных уравнений в конечных разностях был впервые применен Гауссом, однако его чрезвычайная универсальность и действенность не были оценены инженерами и физиками до 30–40-х годов 19-го столетия, когда он был повторно открыт и усовершенствован Саусвеллом и его сотрудниками. В основном он сводится к непрерывному изменению значений потенциала, продолжающемуся до тех пор, пока все совместные уравнения не будут удовлетворены с достаточной степенью точности. Этот метод предназначен для расчетов вручную и эффективность применения его зависит от опыта расчетчика. В последнем отношении он существенно отличается от других методов, рассмотренных, поскольку невозможно сформулировать общие правила выполнения операций и при решении какой-либо конкретной задачи два расчетчика никогда не будут точно следовать по одному и тому же пути. В связи с этим определения основных операций решения, приведенные ниже, на первый взгляд могут показаться недостаточно полными. Однако ввиду крайней простоты метода уже небольшая практика быстро дает опыт, необходимый для выбора правильного пути решения любой задачи.

2.3.1 Релаксационный метод

В основе релаксационного метода лежит понятие об остатке. Если потенциалы A_0, A_1, \dots, A_4 выбраны таким образом, что уравнение в конечных разностях (2.53) справедливо, то его правая часть равна нулю. Однако если значения потенциалов не удовлетворяют этому уравнению, то его правая часть равна не нулю, а некоторой величине R_0 , определяемой соотношением

$$R_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - 4A_0 + h^2W \quad (2.56)$$

Величина R_0 называется остатком уравнения в конечных разностях для узла θ , и релаксационный метод заключается в последовательном уменьшении до нуля (снятии) остатков всех уравнений. Если остатки всех уравнений в конечных разностях равны нулю, то значения потенциала соответствуют точному решению, однако практически для получения хорошего приближения к точному решению достаточно ограничиться уменьшением их до малых значений.

Следует отметить, что строгой зависимости между величинами остатков и точностью определения потенциалов не существует. Практикой установлено, что решения в общем случае удовлетворительны, если:

- а) значения отдельных остатков уменьшены примерно до 0,1% среднего значения потенциалов;
- б) алгебраическая сумма всех остатков имеет тот же порядок, что и отдельные остатки;
- в) распределение остатков с учетом их величины и знаков равномерно по всей области поля.

Более подробно релаксационный метод описан в [84].

Релаксационный метод рассчитан на выполнение расчетов вручную и в этом отношении обладает двумя характерными особенностями:

- а) Метод вызывает интерес у расчетчика, постоянно требуя изобретательности и сноровки.
- б) Сущность метода такова, что исправление ошибок происходит автоматически (в ходе выполнения обычных операций); поэтому он не требует систематической проверки.

Исходя из предшествующего анализа, можно прийти к выводу о невозможности составления твердых правил, которые могли бы быть использованы при решении любой конкретной задачи, и в действительности именно этой универсальностью объясняется действенность метода в руках опытного расчетчика. Точно так же отсутствие твердых правил препятствует успешному программированию метода для расчета на вычислительной машине.

Для наиболее эффективного использования метода можно сформулировать ряд полезных практических рекомендаций:

Размер ячейки сетки. Одно из основных требований касается правильного определения размера ячейки сетки, при этом, для уменьшения неудобств, связанных с появлением асимметричных звезд, выбор должен быть сделан таким образом, чтобы сетка на возможно большем участке совпадала с границей. На первых этапах расчета не следует использовать мелкую сетку, поскольку это связано с непроизводительной затратой труда и приводит к медленной сходимости. Напротив, первый расчет должен быть выполнен с помощью крупной сетки, а когда для нее будет получена удовлетворительная сходимость, следует перейти к более мелкой сетке. Размер ячейки новой сетки удобно принять равным половине размера ячейки предыдущей сетки; тогда новые узлы будут расположены посредине между старыми. Значения потенциала новых узлов находятся с удовлетворительным приближением в результате линейной интерполяции (поскольку она дает точность, эквивалентную точности уравнений в конечных разностях). Последовательное уменьшение размера ячейки сетки должно производиться до тех пор, пока не будет получена достаточно мелкая сетка.

Применение мелких сеток, конечно, должно быть ограничено небольшими областями, для которых точность расчета особенно важна.

Составление расчетного формуляра. После выбора наиболее рационального размера ячейки сетки необходимо вычертить границу (и сетку) в таком масштабе, чтобы было достаточно места для выполнения расчетов на сетке. Целесообразно выполнять чертеж на плотной бумаге, а расчеты производить на накладываемых на него листах кальки, это позволяет сохранить чертеж при стирании записей резинкой.

Десятичные дроби. Десятичные дроби вообще не рекомендуется использовать при расчетах, поскольку они неудобны и увеличивают опасность появления ошибок. Вместо этого, при необходимости, (например, если десятичные дроби присутствуют в исходных данных, при уменьшении остатков до значений порядка единицы или при переходе к более мелкой сетке) все числа следует умножить на 10 в соответствующей степени и выполнять расчеты в целых цифрах. Единственное исключение из этого правила может быть допущено на последних этапах расчета для узлов, связанных с асимметричными звездами. Изменения остатка в асимметричных звездах, вообще говоря, связаны с появлением десятичных дробей. Но даже для таких звезд на первых этапах расчета вполне достаточно учитывать лишь целые числа, округляя числа, содержащие десятичные дроби. Это оправдано, благодаря тому, что погрешности в определении остатков (возникающие в результате округления) легко могут быть ис-

правлены на любом этапе расчета путем пересчета остатков, исходя из текущих значений потенциала.

Расчет. Как было показано выше, задача расчета заключается в том, чтобы сделать остатки и их алгебраическую сумму малыми величинами и распределить их равномерно между узлами сетки. Следует, по возможности, шире применять блочную (или линейную) релаксацию и переходить к узловой релаксации лишь тогда, когда дальнейшее составление блоков становится нецелесообразным. В первую очередь должно быть обращено внимание на области, где остатки особенно велики, а также на области, где они окружены остатками противоположного знака, поскольку в таких случаях как положительные, так и отрицательные остатки могут быть сняты одновременно.

Проверка. Выше уже отмечалось, что возникающие в ходе расчетов ошибки в основном исправляются автоматически, однако, их следует свести к минимуму внимательными вычислениями, поскольку они замедляют сходимость. Для того, чтобы получить уверенность в отсутствии расхождения между значениями потенциала и остатка в узлах (приводящего к ошибке в определении потенциала, если остатки равны нулю), в ходе расчета важно время от времени, особенно при переходе к более мелкой сетке, производить пересчет остатков, исходя из текущих значений потенциала.

2.3.2 Итерационный метод

При решении уравнений в конечных разностях итерационным методом, так же как и при использовании релаксационного метода, производится непрерывное изменение значений потенциала до тех пор, пока все уравнения не будут удовлетворены с достаточной степенью точности. Положения относительно устойчивости и точности решения для обоих методов аналогичны, однако, все итерационные методы характеризуются двумя особенностями, которые отличают их от релаксационного метода.

Во-первых, они разработаны для использования в полностью автоматическом цикле операций, где каждое из уравнений (и, следовательно, каждый узел сетки) рассматривается в ходе расчетов по очереди. Во-вторых, уточненные значения потенциала находятся непосредственно из уравнений в конечных разностях и понятие об остатке в этом отношении не используется. Первая из отмеченных выше особенностей проявляется, в том, что основной итерационный метод имеет более медленную сходимость, чем релаксационный метод. Однако она в то же время позволяет легко запрограммировать итерационные методы для расчетов на вычислительной машине и, таким образом, исключает необходимость выполнения

вручную расчетов, которые при использовании релаксационного метода могут быть очень трудоемкими.

Возможность применения вычислительных машин является большим преимуществом данного метода и, действительно, повышение интереса к итерационным методам тесно связано с развитием компьютерной техники. За последнее время было предпринято интенсивное исследование этой проблемы со стороны математиков, что привело к непрерывному созданию и совершенствованию действенных методов. Однако, наилучшим из них, с точки зрения общего применения для решения практических задач, в настоящее время является так называемый экстраполяционный метод Либмана, сочетающий быструю сходимость и простоту.

Так же, как и для релаксационного метода, можно привести несколько общих указаний относительно применения метода.

а) Число итераций, требуемых для получения заданного снижения ошибки, возрастает примерно пропорционально квадратному корню из числа узлов.

б) Наилучшая сходимость характерна для «простых» конфигуральных границ, таких, как квадрат и ухудшается для более сложных областей, особенно имеющих узкие зоны.

в) При заданных конфигурации границ и числе узлов сходимость для краевых задач второго и третьего рода хуже, чем для краевых задач первого рода.

г) При использовании сильно завышенного значения α зависимость изменения остатка в функции числа итераций становится колебательной.

д) Если задание начального распределения потенциалов имеет существенное значение для более продолжительных расчетов, то для коротких расчетов лучше произвести дополнительные итерации и не тратить время на выполнение ориентировочного расчета и подготовку данных для вычислительной машины.

Необходимо так же упомянуть об использовании для получения быстрой сходимости изменяющегося в ходе итерационного процесса коэффициента сходимости. Хотя определение оптимального значения α на каждом этапе расчета очень сложно даже методом повторных попыток, предложен ряд вполне удовлетворительных расчетных схем, в которых используются переменные, хотя и не обязательно оптимальные значения α . В одной из них, α принимает значения 1 и 2, причем 1 используется в тех случаях, когда соседние остатки имеют противоположные знаки, а 2, когда они имеют одинаковые знаки.

2.3.3 Граничные условия для градиента

Уравнения в конечных разностях, которые будут выведены ниже, одинаково пригодны для релаксационного и итерационного методов.

Подлежащие рассмотрению граничные условия относятся к прямолинейным и криволинейным границам, совпадающим и не совпадающим с узлами сетки, и к поверхностям раздела между областями, которые имеют различные электрические или магнитные постоянные и разные значения плотности тока. Существует очень много различных комбинаций, перечисленных выше факторов, и нет необходимости детально рассматривать уравнения в конечных разностях для каждого случая. Однако, рассмотрим наиболее важные уравнения, полученные в общем виде.

Границы делятся на две группы в зависимости от того, совпадают они с узлами сетки или нет. Границы, совпадающие с узлами, параллельные линиям сетки и диагональные по отношению к ним, границы, не совпадающие с узлами, параллельные линиям сетки (но не совпадающие с ними), а также общий случай криволинейных границ.

2.3.4 Границы, совпадающие с узлами сетки

Для каждой из двух разновидностей границ, совпадающих с узлами сетки, а именно параллельных и диагональных по отношению к сетке, требуются два разных уравнения в конечных разностях: одно – для узлов, расположенных в углах границы, а другое – для остальных узлов, лежащих на границе. Для той или другой разновидностей границ вначале рассмотрены узлы, не примыкающие к углам, а анализ параллельных границ предшествует анализу диагональных границ.

Наиболее общие условия на границе или поверхности раздела, которые могут встретиться в практике, относятся к двум областям, имеющим различные магнитные проницаемости, при протекании в одной из них тока, и эти условия приняты для каждой из описанных выше разновидностей границ. Для особенно полезного случая параллельных границ представлен также ряд важных частных модификаций уравнений.

Границы, параллельные линиям сетки – общий случай. Рассмотрим границу и узлы, изображенные на рисунке 2.20. Допустим, что в области a , лежащей слева от границы, протекает ток, распределенный равномерно с плотностью J , а область b , лежащая справа от границы, обесточена. Кроме того, предположим, что индекс a определяет величины A , μ и W в области a , а индекс b относится к тем же величинам в области b .

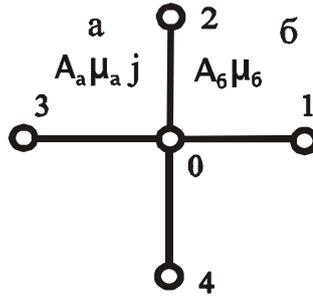


Рисунок 2.20 – Граница параллельная линиям сетки

Для всех узлов в области a , включая лежащие на границе, удовлетворяется уравнение Пуассона, поэтому, согласно уравнению (2.53) для узла 0 имеем:

$$A_{a1} + A_{a2} + A_{a3} + A_{a4} - 4A_{a0} + h^2 W = 0 \quad (2.57)$$

а для всех узлов в области b справедливо уравнение Лапласа, в связи с чем из (2.53) при $W = 0$ для узла 0 следует:

$$A_{b1} + A_{b2} + A_{b3} + A_{b4} - 4A_{b0} = 0 \quad (2.58)$$

Однако, потенциалы A_{a1} и A_{b3} не имеют физического смысла, поскольку узлы 1 и 3 лежат, соответственно, в областях a и b . Такие потенциалы называются *фиктивными* и часто применяются при анализе влияния границ. Хотя они и не используются практически, тем не менее их можно рассматривать как математические величины, необходимые для вывода уравнения, относящегося к узлу, лежащему на границе. Это объясняется тем, что в граничные условия между двумя областями, выраженные в конечных разностях, также войдут фиктивные величины A_{a1} и A_{b3} и их, таким образом, можно исключить с помощью уравнений (2.57) и (2.58).

В окончательном виде уравнение в конечных разностях для типового узла 0 будет иметь вид

$$A_{b1} \frac{2}{1+R} + A_2 + A_{a3} \frac{2R}{1+R} + A_4 - 4A_0 + \frac{R}{1+R} h^2 W_a = 0 \quad (2.58)$$

Граница между областями полей Пуассона и Лапласа – одинаковые магнитные проницаемости. Часто применяется уравнение для узлов, лежащих на границе между областями, имеющими одинаковые магнитные проницаемости, когда в одной из них протекает ток, а в другой тока нет. Его нетрудно получить, положив в уравнении (2.58) $\mu_a = \mu_b$, т. е. $R = 1$, откуда

$$A_{b1} + A_2 + A_{a3} + A_4 - 4A_0 + \frac{1}{2} h^2 W_a = 0 \quad (2.59)$$

Граница между двумя областями полей Лапласа – различные магнитные проницаемости. Уравнение для узла, лежащего на границе между двумя областями, свободными от токов, с различными магнитными про-

ницаемостями можно получить, положив в уравнении (2.58) $W_a = 0$. В этом случае может потребоваться также уравнение для скалярного потенциала.

$$\psi_{\sigma 1} \frac{2}{1+R} + \psi_2 + \psi_{a3} \frac{2R}{1+R} + \psi_4 - 4\psi_0 = 0 \quad (2.59)$$

где $R = \mu_a / \mu_b$ для магнитных полей и $R = \varepsilon_a / \varepsilon_b$ для электрических полей.

Если $R = 1$, то уравнение (2.59) превращается в простое уравнение Лапласа в конечных разностях для симметричной звезды.

Граница между двумя областями полей Лапласа – магнитная проницаемость одной из них бесконечно велика. Если магнитная проницаемость области a бесконечно велика, то поток пересекает границу под прямым углом. Это условие для нормальной составляющей градиента выражается уравнением

$$2A_{\sigma 1} + A_2 + A_4 - 4A_0 = 0 \quad (2.60)$$

которое нетрудно получить, положив в уравнении (2.58) $R = 0$.

Угловой узел для границ, параллельных сетке – общий случай. Приведенные выше уравнения относятся ко всем узлам, за исключением узлов, лежащих в углах границы; для таких углов требуется другое уравнение. Рассмотрим прямой угол, образуемый поверхностью раздела между областями a и b , имеющими те же магнитные проницаемости и токи, что и прежде (рисунок 2.21). В связи с представлением поля дискретными точками действительная конфигурация границ не поддается точному учету и для вывода уравнения, относящегося к угловому узлу, необходимо ввести две дополнительные границы.

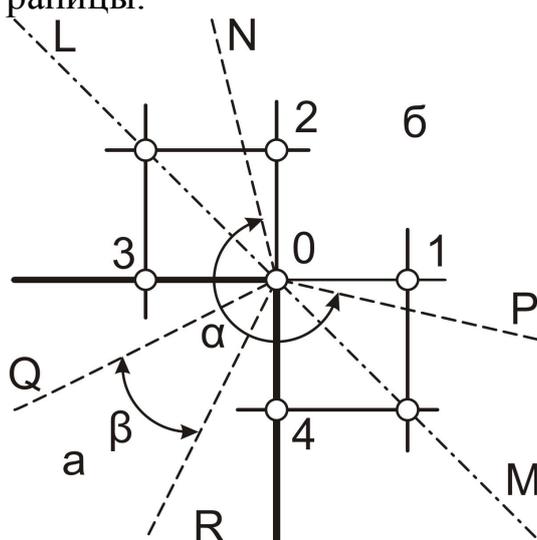


Рисунок 2.21 – Угловой узел для границ

Они расположены симметрично по отношению к углу и представлены пунктирными линиями, образующими углы α и β . Для узла 0 , лежащего на границе NOP , действительно одно и то же уравнение при любом зна-

чении α в пределах $\frac{\pi}{2} - 3\frac{\pi}{2}$ и аналогичным образом одно уравнение справедливо для того же узла, лежащего на границе QOR, при любом значении β в пределах $0 - \frac{\pi}{2}$. Исходя из этих двух уравнений, находим уравнение для узла θ , лежащего на действительной границе, которое дает среднее из двух значений A_0 .

Уравнение для границы QOR нетрудно получить на основании анализа случая, когда $\beta = 0$ (при этом граница исчезает); оно имеет вид:

$$A_{\beta 1} + A_{\beta 2} + A_{\beta 3} + A_{\beta 4} - 4A_0 = 0 \quad (2.61)$$

В то же время уравнение для границы NOP в частном случае, когда $\alpha = \pi$, соответствует уравнению для границы LM. Уравнение в конечных разностях для узлов, лежащих на такой диагональной границе, представлено следующим образом:

$$A_{\beta 1} + A_{\beta 2} + R(A_{a3} + A_{a4}) - 2(1+R)A_0 + \frac{1}{2}Rh^2W_a = 0 \quad (2.62)$$

Следовательно, объединив уравнения (2.61) и (2.62) и принимая во внимание равенство A_{a3} и $A_{\beta 3}$, а также A_{a4} и $A_{\beta 4}$, получим уравнение для узла θ , расположенного в вершине прямого угла поверхности раздела, в виде:

$$A_{\beta 1} + A_{\beta 2} + \frac{1}{2}(1+R)(A_3 + A_4) - (3+R)A_0 + \frac{1}{4}Rh^2W_a = 0 \quad (2.63)$$

Соответствующие уравнения для случая, когда ток протекает в области \bar{b} , находятся таким же путем.

Важный частный случай, вытекающий из уравнения (2.63), относится к узлу, расположенному в вершине угла области с бесконечно большой магнитной проницаемостью, занимающей три квадранта (т. е. образующей угол $3\pi/2$), когда обе области обесточены. Результирующее уравнение для случая, когда область \bar{b} имеет бесконечно большую магнитную проницаемость, можно получить, положив в приведенном выше уравнении $R = \infty$. Тогда

$$A_3 + A_4 - 2A_0 = 0 \quad (2.64)$$

Границы, диагональные по отношению к сетке – общий случай.

При выводе уравнений для узлов, лежащих на границе, диагональной по отношению к сетке (рисунок 2.22), возможны два подхода, которые приводят к уравнениям, связывающим различные группы узлов. Можно или непосредственно использовать с небольшими изменениями уравнения, полученные выше, или составить новую (и более точную) систему уравнений.

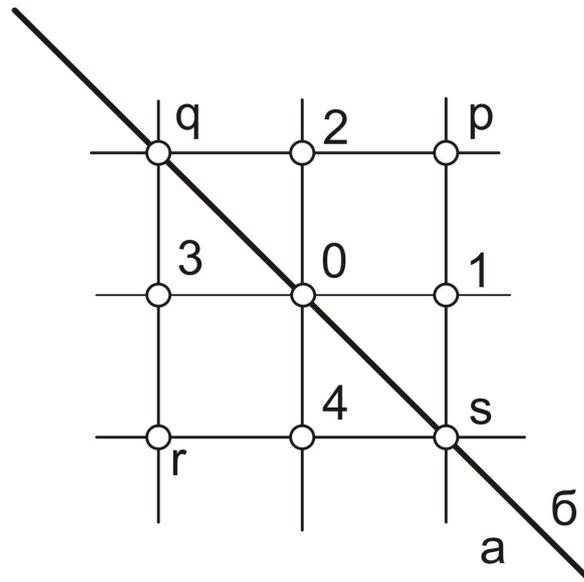


Рисунок 2.22 – Диагональная граница по отношению к сетке

Для того, чтобы применить выведенные выше уравнения к диагональной границе, необходимо повернуть звезду в лежащем на границе узле на 45° и увеличить размер ячейки сетки в $\sqrt{2}$ раз. Таким образом, с использованием обозначений на рисунке 2.22 общее уравнение, полученное из уравнения (2.58), будет иметь вид:

$$A_{bp} \frac{2}{1+R} + A_q + A_{ar} \frac{2R}{1+R} + A_3 - 4A_0 + \frac{2R}{1+R} Rh^2 W_a = 0 \quad (2.65)$$

В связи с укрупнением сетки это уравнение менее точно, чем уравнения для узлов, не лежащих на границе.

Более точное уравнение для узла 0 можно получить, исходя из значений потенциала в узлах $1-4$, по методу, аналогичному использованному при выводе уравнения (2.58); при этом необходимо рассмотреть узлы x и y , где x является средней точкой отрезка, соединяющего узлы 1 и 2 , а y – средней точкой отрезка, соединяющего узлы 3 и 4 . Потенциал A_0 в узле 0 удовлетворяет уравнениям Пуассона и Лапласа в конечно-разностном виде. Выполнив некоторые преобразования приходим к уравнению в конечных разностях в виде:

$$2(A_{b1} + A_{b2}) + 2R(A_{a3} + A_{a4}) - 4(1+R)A_0 + Rh^2 W_a = 0 \quad (2.66)$$

Угловой узел в случае диагональных границ – общий случай.

Уравнение для узла, лежащего в вершине прямого угла, образованного пересечением двух поверхностей раздела, диагональных по отношению к сетке, можно получить из предпосылок, аналогичных использованным выше. Если область a , где протекает ток, представляет собой квадрат, в котором находится узел 3 , то уравнение будет иметь вид:

$$A_{b1} + \frac{1}{2}(1+R)A_{a3} + \frac{1}{4}(3+R)(A_{b2} + A_{a4}) - (3+R)A_0 + \frac{1}{4}Rh^2 W_a = 0 \quad (2.67)$$

2.3.5 Границы, не совпадающие с узлами сетки

Теперь перейдем к рассмотрению общей группы границ, не совпадающих с узлами сетки (включая как прямолинейные, так и криволинейные границы). Однако прежде чем приступить к общему анализу, остановимся на частном случае прямолинейной границы, параллельной линиям сетки (но не совпадающей с ними).

Прямолинейная граница, параллельная сетке. При анализе этой группы границ вводятся дополнительные узлы в точках пересечения границы с сеткой (рисунок 2.23).

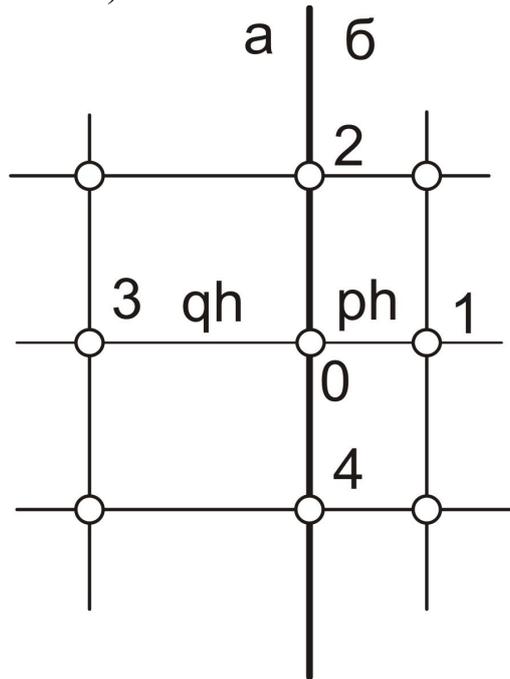


Рисунок 2.23 – Прямолинейная граница параллельная сетке

Уравнение Пуассона в конечных разностях для любого из таких дополнительных узлов имеет вид:

$$A_1 \frac{2}{p(p+q)} + A_2 + A_3 \frac{2}{q(p+q)} + A_4 - 2A_0 \left(1 + \frac{1}{pq}\right) + h^2 W_a = 0 \quad (2.68)$$

Используя это уравнение для определения фиктивных потенциалов A_{a1} и A_{b3} и подставив найденные выражения в уравнение (2.14), отражающее граничные условия, получим уравнение в конечных разностях для узлов, лежащих на границе, в виде:

$$A_1 \frac{2}{p(pR+q)} + A_2 + A_3 \frac{2}{q(pR+q)} + A_4 - 2A_0 \left(1 + \frac{1}{pq}\right) + h^2 \frac{W_a pR}{(q+pR)} = 0 \quad (2.69)$$

Оно выведено в обычном предположении, что ток протекает только в области a . При использовании этого уравнения узлы на границе рассматриваются непосредственно как часть общей сетки. Это, конечно, приводит к необходимости применения уравнений в конечных разностях для

асимметричных звезд, которые относятся к узлам, расположенным на границе и в непосредственной близости к ней.

Криволинейные границы – общий случай.

Ряд уравнений составлен для использования в случае криволинейных границ, вдоль которых задана нормальная составляющая градиента, однако, насколько нам известно, не было предложено общего уравнения, связывающего поля по ту и другую стороны границы, соответствующего уравнению (2.58). Если бы такие уравнения существовали, то их применение было бы связано со многими трудностями: они были бы очень громоздкими, расчеты были бы связаны с многочисленными измерениями длин отрезков для асимметричных звезд и необходимыми геометрическими построениями; кроме того, для получения достаточно точных результатов потребовалась бы очень мелкая сетка. Поэтому наиболее правильным выходом из положения является не применение дополнительных уравнений в конечных разностях, а аппроксимация конфигурации границы большим числом прямолинейных участков, параллельных или диагональных по отношению к линиям сетки. Точность такого представления можно оценить, исходя из рассмотрения отклонений принятой конфигурации границ от действительной.

В связи с изложенными выше замечаниями, а также ввиду того, что наиболее общий тип граничных условий в практике встречается редко, можно отказаться от попытки вывести общие уравнения и сосредоточить внимание на частном случае граничных условий для нормальной составляющей градиента, которые встречаются наиболее часто.

Граничные условия для нормальной составляющей градиента.

Рассмотрим криволинейную границу, изображенную на рисунке 2.24, вдоль которой задано распределение нормальной составляющей гра-

диента $\frac{\partial A}{\partial n}$.

аналитических методов. Решения, найденные методом конечных разностей, являются приближенными, однако, можно получить любую желаемую степень точности при условии, что расчет продолжается достаточное время. Тем не менее, для многих практических задач требуемую точность удается получить очень быстро. Необходимо считаться с тем, что все численные методы требуют отдельного решения для каждой совокупности параметров задачи (хотя в некоторых случаях можно значительно сократить время расчетов, приняв конечное решение одной задачи в качестве исходных данных для другой аналогичной задачи). Если задача может быть решена как аналитическими, так и численными методами, то выбор часто определяется продолжительностью расчетов. Конечно, аналитические методы обычно являются предпочтительными, однако в некоторых приложениях они могут потребовать настолько длительной обработки, а иногда и расчетов, что численные методы станут более экономичными. Это особенно вероятно в том случае, если для итерационного метода подготовлена общая программа расчета на вычислительной машине и требуется лишь ввести данные, определяющие конфигурацию границ и граничные условия.

Выбор между релаксационным и итерационным методами в основном, зависит от того, будут ли расчеты проводиться вручную или на вычислительной машине, а также от задаваемой точности решения, числа подлежащих расчету частных случаев и граничных условия задачи. Для решений, требующих высокой точности, или при большом объеме расчетов преимущества итерационного метода несомненны, однако, для некоторых задач с очень сложными конфигурацией границ и граничными условиями ценность этого метода ограничена двумя обстоятельствами. Во-первых, число узлов сетки и вспомогательных величин, необходимых для правильной формулировки задачи, может быть ограничено объемом памяти вычислительной машины и, во-вторых, может потребоваться слишком много времени для составления программы. В том и другом случаях в настоящее время, особенно для задач, в которых на криволинейных границах задаются условия для градиента, предпочтительны методы расчета вручную. Однако, задачи Дирихле для всех конфигураций границ и задачи, в которых на прямолинейных границах задана нормальная составляющая градиента, нетрудно решить итерационными методами с использованием разработанных для них общих программ.

2.4 МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов (МКЭ) на основе вариационного принципа возник из решения задач теории упругости, что и определило, в основном, терминологию, используемую в процессе его применения в других разделах механики сплошных сред (теории теплопроводности, газовой динамике и др.) [85]. Использование в МКЭ методов взвешенных невязок (таких, например, как методы коллокаций Галеркина, наименьших квадратов) позволило отказаться от вариационного принципа в МКЭ, тем более, что не для всякой задачи можно построить функционал, минимум которого дает исследуемое дифференциальное уравнение. Тем самым круг решаемых задач механики сплошных сред был существенно расширен [144, 145, 149].

Пусть в области $\bar{\Omega} = \Omega + \Gamma$ необходимо решить некоторую дифференциальную задачу. Тогда в МКЭ осуществляется следующая цепочка процедур.

1. Область $\bar{\Omega}$ разбивают на подобласти в количестве E штук ($e = \overline{1, E}$), называемые конечными элементами, такие, что

$$\Omega = \bigcup_{e=1}^E \Omega^e, \quad \Gamma = \bigcup_{e=1}^E \Gamma^e.$$

2. В каждом конечном элементе $\bar{\Omega}^e = \Omega^e + \Gamma^e$ выбирается система нумерованных узлов, в которых значения искомой функции являются неизвестными величинами.

3. Каждому нумерованному узлу приписывается базисная функция такая, что в этом узле она равна единице, а в остальных нумерованных узлах расчетной области – нулю. Число базисных функций в расчетной области равно числу нумерованных узлов, причем для различных узлов они обладают свойством линейной независимости (или ортогональности) по всей расчетной области.

4. Решение искомой дифференциальной задачи приближенно строится в виде линейной комбинации базисных функций по всем нумерованным узлам расчетной области с коэффициентами линейной комбинации, равными значениям искомой функции в нумерованных узлах.

5. Это решение подставляется в дифференциальную задачу и, поскольку решение приближенное, результатом подстановки будет не тождественный нуль, а некоторая функциональная невязка.

6. С помощью известных методов взвешенных невязок (коллокаций Галеркина, наименьших квадратов) функциональная невязка минимизируется по всей расчетной области путем приравнивания нулю скалярного произведения функциональной невязки и весовых функций (скалярное произведение от непрерывных функций равно определенному интегралу

по расчетной области от произведения этих функций), причем в методе взвешенных невязок Галеркина весовые функции в нумерованных узлах совпадают с базисными функциями. В результате получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно значений искомой функции в нумерованных узлах, коэффициентами в которой являются интегралы по всей расчетной области от базисных функций и их производных.

7. Определенные интегралы по всей расчетной области заменяются на сумму интегралов по конечным элементам, что, в силу ортогональности базисных функций, делает матрицу СЛАУ сильно разреженной, с ненулевыми элементами, расположенными в окрестности главной диагонали (так называемые ленточные матрицы, частным видом которых является трехдиагональная матрица).

8. Решается СЛАУ относительно узловых значений искомой функции каким-либо известным методом (Гаусса, простых итераций, Зейделя и т.п.). Результаты решения подставляются в приближенное решение по п. 4. При этом полученные значения искомой функции в нумерованных узлах каждого конечного элемента могут быть использованы для получения решения во всех точках конечного элемента $\bar{\Omega}^e = \Omega^e + \Gamma^e$ с помощью так называемых функций элементов, простейшим случаем которых является линейный интерполяционный многочлен в R^n согласно [145].

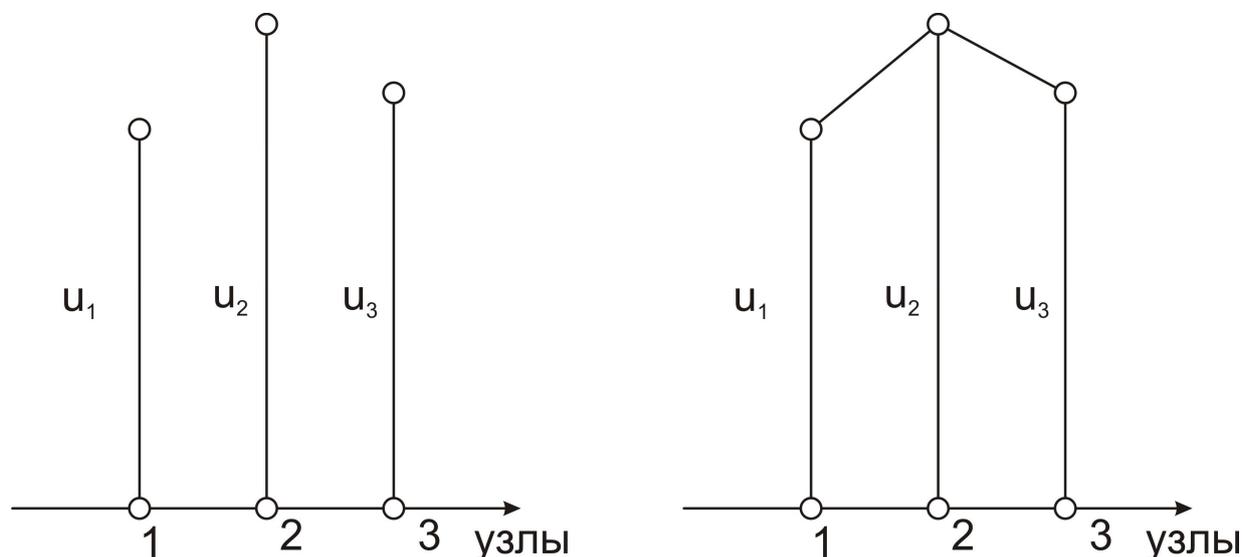


Рисунок 2.25 – Представление решения в МКР (а) и МКЭ (б)

Таким образом, существенным отличием МКЭ от метода конечных разностей (МКР) является то, что в МКЭ решение на каждом элементе получается в виде непрерывных (или гладких) функций, в то время как в МКР – в виде сеточной функции (рисунок 2.25).

2.5 МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Метод интегральных уравнений дает возможность рассчитать магнитное поле в неоднородной среде (катушка, воздух, сталь, вода и т.д.) свести к расчету в однородной (в вакууме, воздухе).

При этом неоднородности необходимо заменить вторичными источниками поля: магнитные заряды, источники с объемной или поверхностной плотностью тока, вихревыми токами.

Выделяются два подхода к расчету метода интегральных уравнений.

1. Используются условия на границах между неоднородными в магнитном отношении областями. Задачу расчета вторичных источников необходимо свести к граничным интегральным уравнениям первого и второго рода, которые приводятся к уравнениям в конечных суммах для подобластей с постоянными или кусочно-постоянными значениями магнитной проницаемости.
2. Название второго подхода – «метод пространственных интегральных уравнений». Основывается данный подход на общем интегральном выражении магнитной индукции через намагниченность деталей магнитной системы при отсутствии каких-либо дополнительных краевых условий. Расчет осуществляется по итерационной схеме с учетом нелинейных характеристик подобластей, на которые разбита магнитная система [85].

3 РАЗРАБОТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АМОВ

3.1 ОДНОКАТУШЕЧНЫЙ АППАРАТ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Существует более 100 аппаратов для магнитной обработки воды, многие из которых имеют существенные недостатки:

- сложность конструкции;
- магнитные системы малоэффективны на единицу массы и мощности;
- низкая производительность из-за малой величины пропускного сечения для прохода вещества;
- нетехнологичность, при изготовлении, и трудоемкость, при сборке.

Аппарат магнитной обработки, представленный на рисунке 3.1, лишен перечисленных недостатков [80]. Конструкция аппарата очень проста он содержит: корпус 1 (левая часть) и 6 (правая часть), каркас намагничивающей катушки 2, между двумя половинами корпуса 1 и 6 для герметизации намагничивающей катушки 3 от влаги предусмотрены резиновые прокладки 4 и 5.

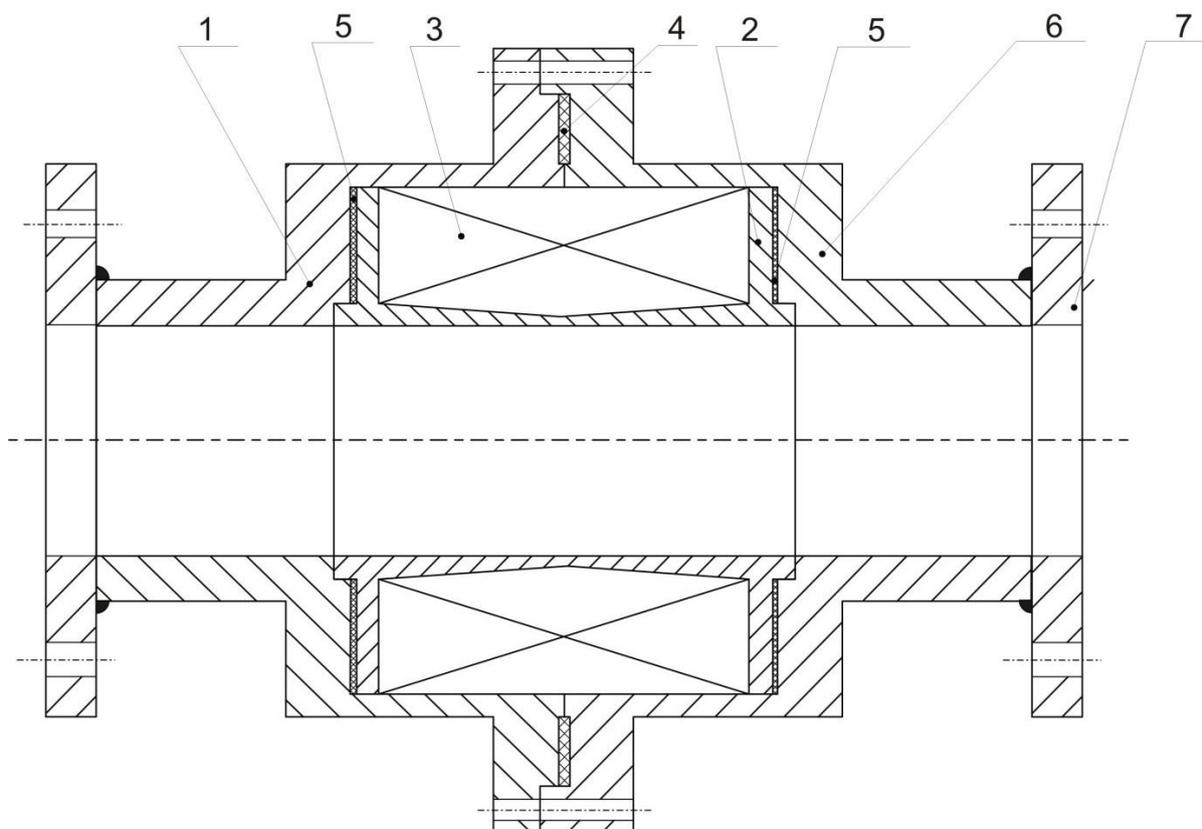


Рисунок 3.1 – Аппарат магнитной обработки воды: 1, 6 – корпус, 2 – каркас намагничивающей катушки, 3 – намагничивающая катушка, 4, 5 – прокладка

При установке аппарата на трубопровод, к наружным частям корпуса 1 и 6, при необходимости устанавливаются фланцы 7. Каркас намагничивающей катушки в осевом сечении имеет тонкую стенку.

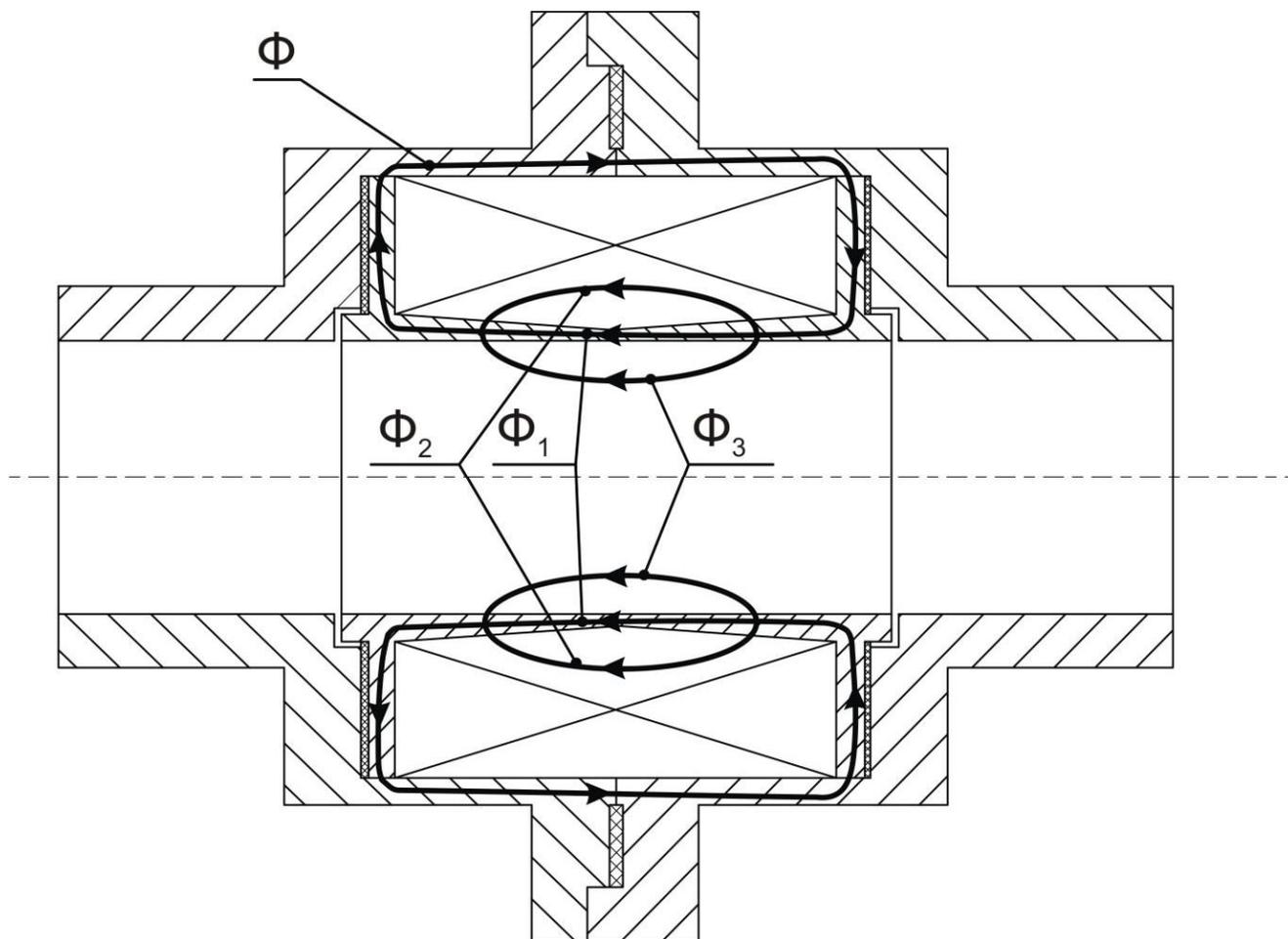


Рисунок 3.2 – Принцип работы аппарата магнитной обработки воды

Аппарат работает следующим образом. При подаче переменного или постоянного тока в намагничивающую катушку 3 образуется магнитный поток Φ (рисунок 3.2), силовые линии которого замыкаются по корпусу 1, 6 и каркасу 2. Тонкая стенка каркаса 2 работает в режиме насыщения и представляет значительное магнитное сопротивление для потока Φ , который разделяется на потоки:

Φ_1 – магнитный поток, замыкающийся по тонкой стенке;

Φ_2 – магнитный поток в объеме намагничивающей катушки;

Φ_3 – магнитный поток, выпучивающийся в сторону обрабатываемой воды.

Вода, движущаяся по трубопроводу с определенной скоростью, многократно пересекает силовые линии магнитного потока Φ_3 и подвергается физическому воздействию. В отличие от существующих конструкций аппаратов, в предложенном аппарате магнитной обработки воды упрощается

герметизация обмотки от обрабатываемой воды, так как основанием намагничивающей катушки 3, служит цельнометаллический каркас 2.

Коренным образом изменен способ формирования рабочего магнитного потока (посредством насыщения тонкой стенки каркаса).

Кроме всего перечисленного, можно варьировать активной зоной выпучивания рабочего потока. Унификация аппарата позволяет с одним и тем же корпусом, посредством замены каркаса 2 с намагничивающей катушкой 3, подобрать оптимальные параметры магнитного поля для любого технологического процесса. В связи с этим были изготовлены каркасы намагничивающих катушек с различными параметрами магнитной системы.

3.2 ДВУХКАТУШЕЧНЫЙ АППАРАТ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Аппарат магнитной обработки воды [68] (рисунок 3.3) содержит, две половины магнитного корпуса 1 и 2, между ними для герметизации магнитного каркаса катушки 3 и намагничивающих катушек 4 и 5 от влаги предусмотрена резиновая прокладка 6. Магнитный каркас катушки 3 имеет тонкие стенки 7, 8 и утолщения 9 и 10, выполненные в виде тороидальных колец, а также магнитопровод 11, который отделяет катушки 4 и 5 друг от друга. Для защиты от влаги магнитный каркас катушки 3 отделен от половинок магнитного корпуса 1 и 2 при помощи резиновых прокладок 12, 13.

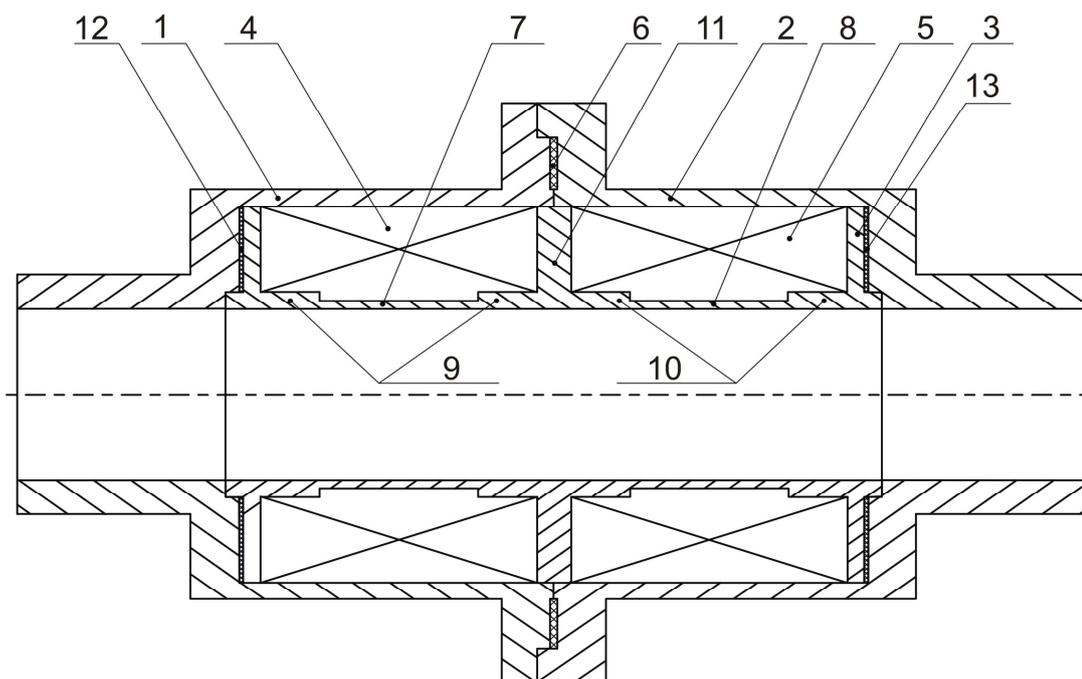


Рисунок 3.3 – Устройство двухкатушечного аппарата магнитной обработки воды

Аппарат магнитной обработки воды работает следующим образом. При подаче постоянного или переменного тока на намагничивающие катушки 4, 5 образуются магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , силовые линии которых замыкаются следующим образом: для магнитного потока Φ_1 : половинка магнитного корпуса 1 – магнитопровод 11 – магнитный каркас катушки 3; для магнитного потока Φ_2 : половинка магнитного корпуса 2 – магнитопровод 11 – магнитный каркас катушки 3.

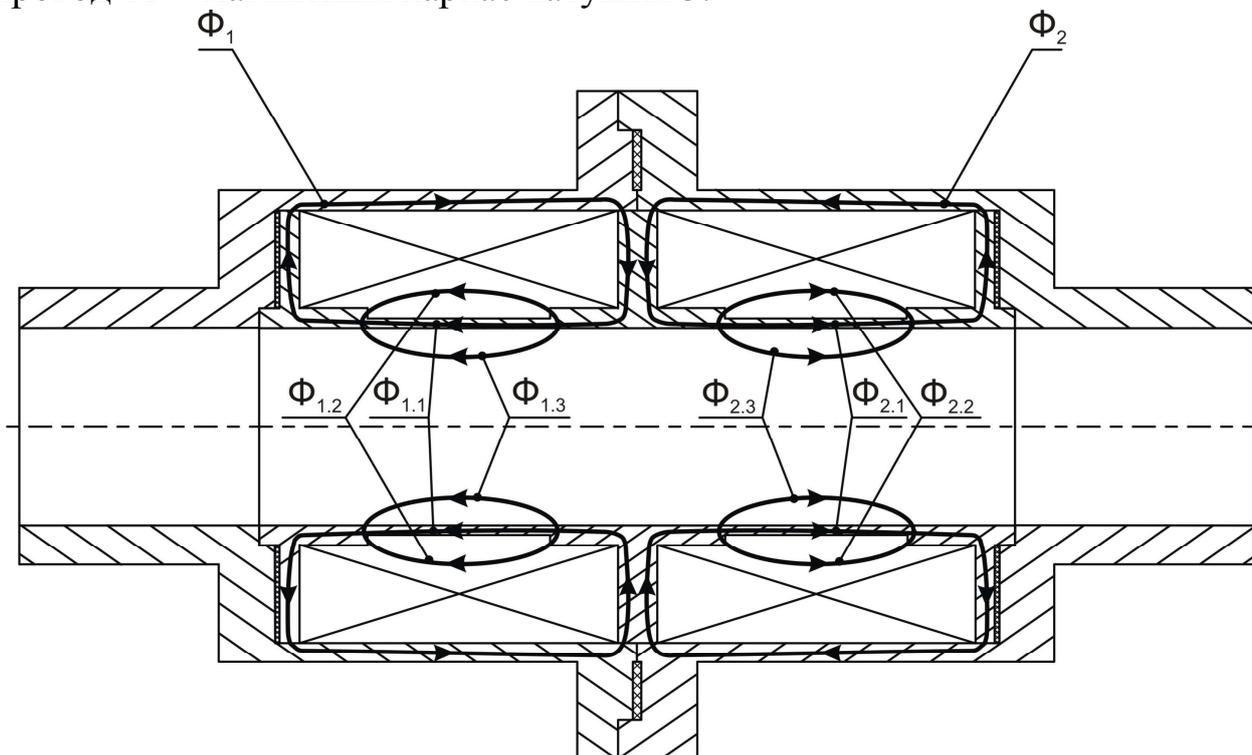


Рисунок 3.4 – Принцип работы двухкатушечного аппарата магнитной обработки воды

Тонкие стенки 7, 8 представляют значительное магнитное сопротивление для магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 . В результате поток Φ_1 разделяется на потоки: $\Phi_{1.1}$ – паразитный магнитный поток, замыкающийся по тонкой стенке 7; $\Phi_{1.2}$ – паразитный магнитный поток в объеме намагничивающей катушки 4; $\Phi_{1.3}$ – полезный магнитный поток, выпучивающийся в сторону обрабатываемого вещества. Поток Φ_2 разделяется на потоки: $\Phi_{2.1}$ – паразитный магнитный поток, замыкающийся по тонкой стенке 8; $\Phi_{1.2}$ – паразитный магнитный поток в объеме намагничивающей катушки 5; $\Phi_{1.3}$ – полезный магнитный поток, выпучивающийся в сторону обрабатываемого вещества.

Движущееся с произвольной скоростью вещество многократно пересекает силовые линии магнитных потоков $\Phi_{1.3}$ и $\Phi_{2.3}$ и подвергается физическому воздействию.

Степень воздействия зависит от напряженности магнитного поля, создаваемого намагничивающими катушками 4, 5, осевого размера тонких стенок 7, 8. Кроме того, в соответствии с законом Кирхгофа для магнитных цепей, в магнитопроводе 11 магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 могут иметь встречное или одинаковое направление, тем самым они усиливают или ослабляют магнитные потоки $\Phi_{1,3}$ и $\Phi_{2,3}$, изменяя степень физического воздействия на обрабатываемое вещество.

По сравнению с прототипом и другими известными техническими решениями предлагаемый аппарат магнитной обработки вещества имеет ряд преимуществ:

- за счет разделения намагничивающих катушек значительно усилен рабочий магнитный поток, что позволяет уменьшить значение приложенного напряжения и повысить эффективность магнитной обработки вещества;

- внесение тонких стенок и утолщений в виде тороидальных колец уменьшает стоимость и трудоемкость изготовления аппарата магнитной обработки вещества;

- универсальность аппарата магнитной обработки вещества достигается возможностью регулирования напряженности магнитного поля путем изменения тока в катушках.

3.3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ELCUT ПРИ РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

3.3.1 Общие сведения

Проектировщик испытывает определенную трудность при расчете электромагнитных аппаратов традиционными методами. Связанно это, прежде всего, со сложностью конструкций, а так же приходится рассматривать нелинейную магнитную цепь. В настоящее время все большее применение получает метод конечных разностей. При использовании ЭВМ, численные методы получают большие преимущества перед аналитическими благодаря простоте алгоритмов расчета, которые состоят из многократно повторяющихся циклов.

Решения, полученные методом конечных разностей, представляют собой совокупность значений описывающих поле функции в дискретных точках, равномерно распределенных по всей области поля. Эти значения находятся путем замены одного описывающего поле дифференциального уравнения с частными производными системой простых уравнений в конечных разностях, которые имеют вид линейных уравнений, связывающих значение потенциала в каждой точке со значениями потенциала в других точках, окружающих ее.

Таким образом, определение поля сводится к решению системы совместных уравнений [84]. При замене уравнений поля системой уравнений в конечных разностях, связывающих значения потенциала в дискретных точках, можно выбрать произвольное пространственное распределение точек. При выборе полностью равномерного распределения точек для каждой из них справедливо уравнение в конечных разностях одного и того же вида и формулировка задачи значительно упрощается. Требуемое распределение обеспечивается расположением точек в «узлах» любой сетки.

Программа ELCUT является разработкой производственного кооператива «ТОР» (Санкт-Петербург).

ELCUT представляет собой интегрированную диалоговую систему программ позволяющую решать следующие плоские и осесимметричные задачи [71, 72]:

- Линейная и нелинейная магнитостатика.
- Магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов).
- Электростатика.
- Растекание токов в проводящей среде.
- Линейная и нелинейная, стационарная и нестационарная теплопередача.
- Линейный анализ напряженно-деформированного состояния.

- Связанные (мультидисциплинарные) задачи.

С помощью ELCUT можно описать задачу - ее геометрию, свойства сред, источники поля, граничные и другие условия, решить ее с высокой точностью и проанализировать решение с помощью средств цветной графики. С помощью ELCUT можно решать сложные задачи расчета полей и теории упругости на персональных компьютерах, не прибегая к помощи больших ЭВМ или рабочих станций.

- ELCUT может решать нестационарные тепловые задачи с нелинейной теплоемкостью и изменяющимися временными параметрами.
- ELCUT имеет удобный редактор данных, выполняющий ряд функций:
- Ввод временных параметров задачи.
- Задание нелинейной теплоемкости (схоже с другими редакторами нелинейных свойств).
- Полная совместимость со стационарными задачами: пользователь может конвертировать ранее созданные задачи в нестационарные с минимальными изменениями.
- ELCUT позволяет показывать картины поля для различных моментов времени, представляет временные зависимости как на графике так и в таблице.

Особенности расчетов задач магнитостатики в ELCUT

Расчет магнитного поля применяется при проектировании и исследовании различных устройств таких, как соленоиды, реакторы, электрические машины, трансформаторы, магнитные экраны и т.п. Обычно при расчетах магнитного поля представляют интерес такие величины, как магнитная индукция, напряженность магнитного поля, магнитостатические силы и моменты, а также потокосцепления с различными обмотками.

Пакет ELCUT может применяться для решения линейных и нелинейных задач магнитостатики в плоской и осесимметричной постановке. Используется формулировка задачи относительно векторного магнитного потенциала.

Основные показатели магнитостатики используемые программой ELCUT

Свойства сред: воздух, изотропные и ортотропные материалы с постоянной магнитной проницаемостью, линейные и нелинейные постоянные магниты, изотропные ферромагнетики, проводники с током.

Кривые намагничивания ферромагнитных материалов легко могут быть заданы при помощи окна работы с кривыми.

Источники поля: распределенные и сосредоточенные токи, однородное внешнее поле и постоянные магниты.

Граничные условия: заданное значение потенциала (условие Дирихле), заданные значения касательной составляющей индукции (условие Неймана) и условие постоянства потенциала (нулевого потока) на поверхностях сверхпроводников.

Результаты расчета: магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, силы, моменты, энергия магнитного поля, потокосцепления, собственные и взаимные индуктивности.

Специальные возможности: Интегральный калькулятор может вычислять различные интегральные значения на определенных пользователем линиях и поверхностях. Магнитные силы могут быть переданы в задачу расчета механических напряжений в элементах конструкции (совмещенная магнито-упругая задача).

Структура базы данных задачи

База данных ELCUT, относящаяся к каждой конкретной задаче, состоит из нескольких частей. Центральной частью этой базы данных является описание задачи, которое при записи на диск помещается в файл с расширением .rbm. Описание задачи содержит общую информацию о задаче: характер предметной области, разновидность постановки, класс точности расчета и т. д. Кроме этого, описание задачи содержит ссылки на все остальные файлы, составляющие базу данных задачи. К их числу относятся файл геометрии модели, имеющий стандартное расширение .mod и файлы физических параметров, имеющие одно из расширений .des, .dms, .dcf, .dht или .dsa в зависимости от предметной области задачи.

База данных ELCUT, относящаяся к каждой конкретной задаче состоит из нескольких частей. Центральной частью этой базы данных является описание задачи, которое при записи на диск помещается в файл с расширением .rbm. Описание задачи содержит общую информацию о задаче: характер предметной области, разновидность постановки, класс точности расчета и т. д. Кроме этого, описание задачи содержит ссылки на все остальные файлы, составляющие базу данных задачи. К их числу относятся файл геометрии модели, имеющий стандартное расширение .mod и файлы физических параметров, имеющие одно из расширений .des, .dms, .dcf, .dht или .dsa в зависимости от предметной области задачи.

Описание задачи может ссылаться на один или два файла физических свойств. Оба файла физических свойств имеют одинаковый формат и отличаются только функциональным назначением. Обычно первый из них содержит данные, относящиеся только к данной конкретной задаче, в то время как второй может использоваться в качестве библиотеки свойств материалов и стандартных граничных условий общих для целого класса

задач.

Размещение базы данных задачи в нескольких файлах позволяет использовать общие файлы геометрии модели или общие файлы физических свойств одновременно в нескольких похожих задачах.

В процессе решения задачи ELCUT создает еще один файл - файл результатов. Этот файл всегда имеет расширение .res, имя, совпадающее с именем файла описания задачи, и помещается в ту же папку, в которой находится файл описания задачи.

Чтобы создать новое, пустое описание задачи, выбирается позиция «Создать» из меню «Файл» или нажать Ctrl+N и затем указывается «Задача ELCUT», в списке предлагаемых типов документов (рисунок 3.5). В данном окне можно выбрать создание геометрической модели и свойств для задач.

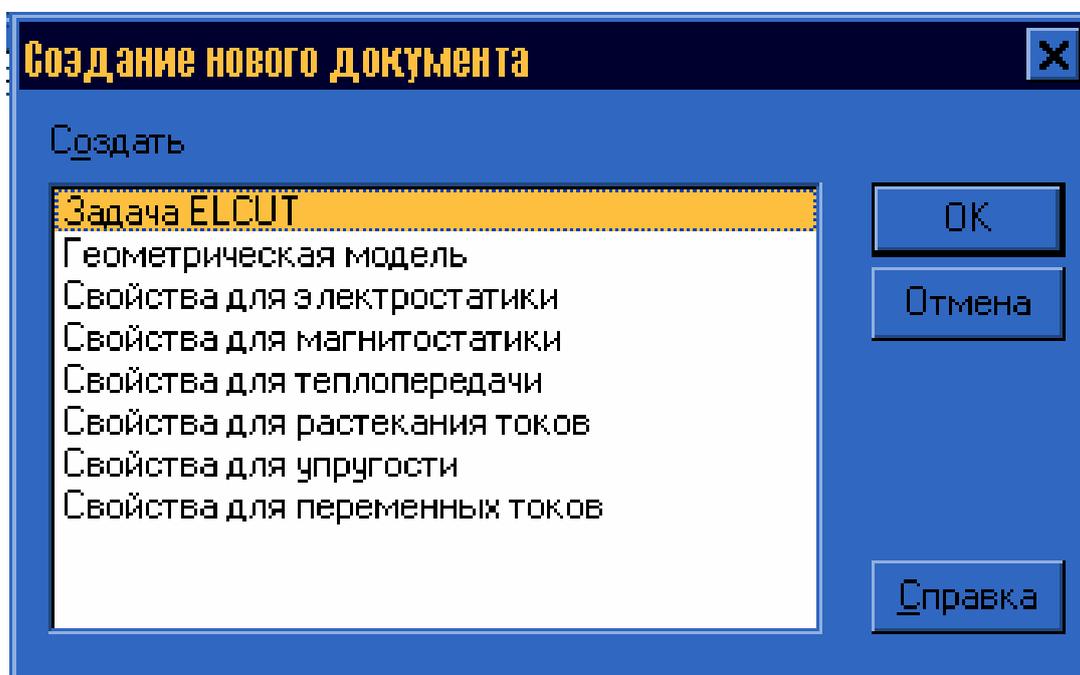


Рисунок 3.5 – Окно создания нового документа

Затем вводится имя и путь для нового описания задачи, причем можно использовать уже существующую задачу как образец (рисунок 3.6).

Далее необходимо выбрать параметры новой задачи: тип анализа, класс симметрии, точность решения, единицы измерения длины и др. Геометрию и свойства задачи можно выбрать из ранее созданных файлов (рисунок 3.7).

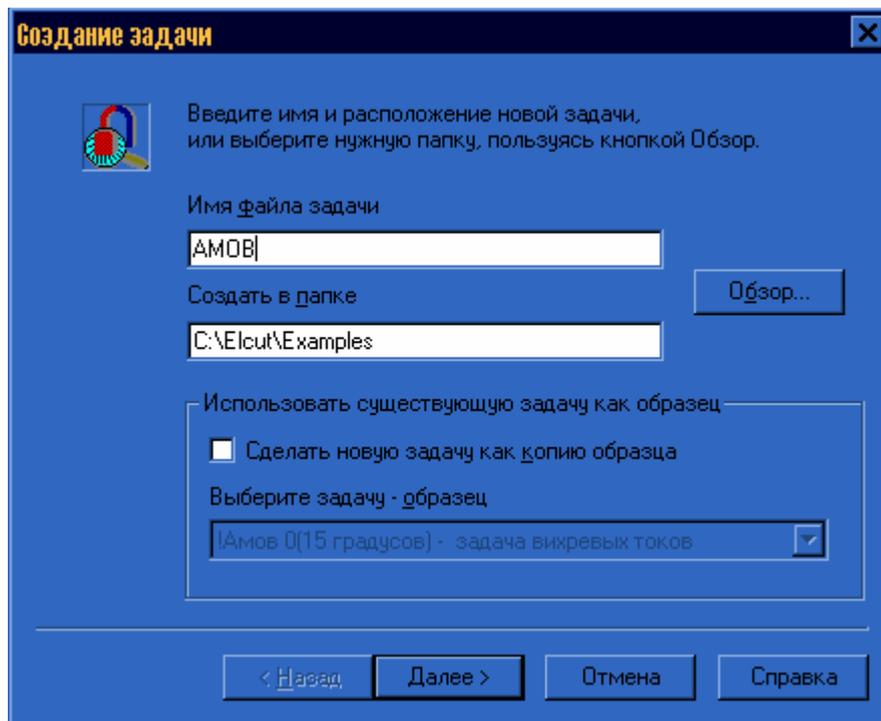


Рисунок 3.6 – Окно создания новой задачи

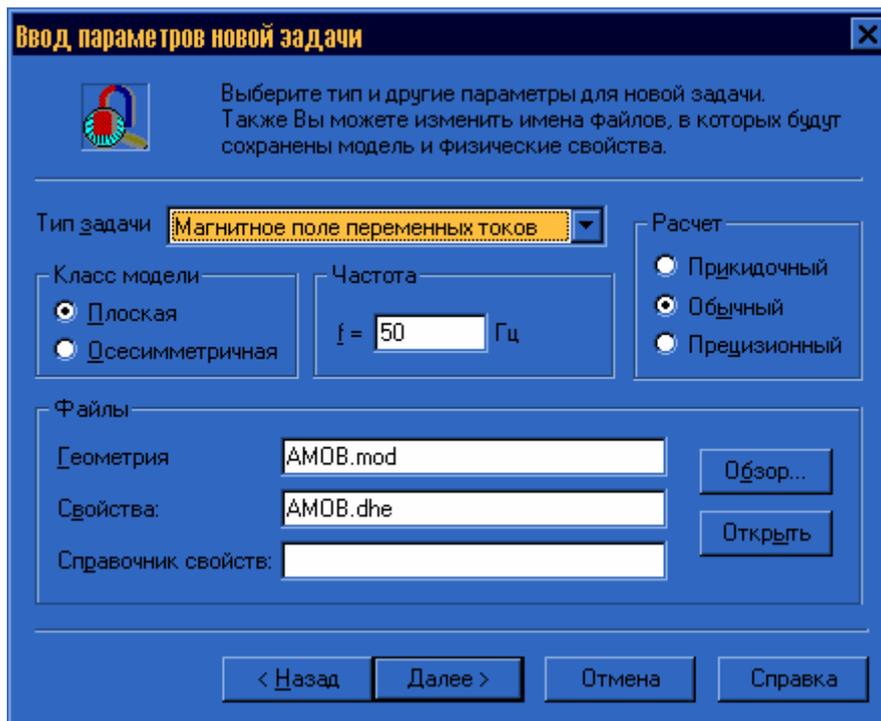


Рисунок 3.7 – Окно ввода параметров новой задачи

Для задачи магнитного поля переменных токов необходимо указать частоту f .

Чтобы открыть существующий документ, необходимо выбрать позицию «Открыть» из меню «Файл» или перетащить файл в окно ELCUT из проводника Windows или нажать Ctrl+O.

Для того, чтобы сохранить созданный документ, выбирается позиция

«Сохранить» из меню «Файл» или нажимается Ctrl+S. При выборе позиции «Сохранить как ...» из меню «Файл» можно сохранить документ, предварительно указав его имя и место расположения (рисунок 3.8).

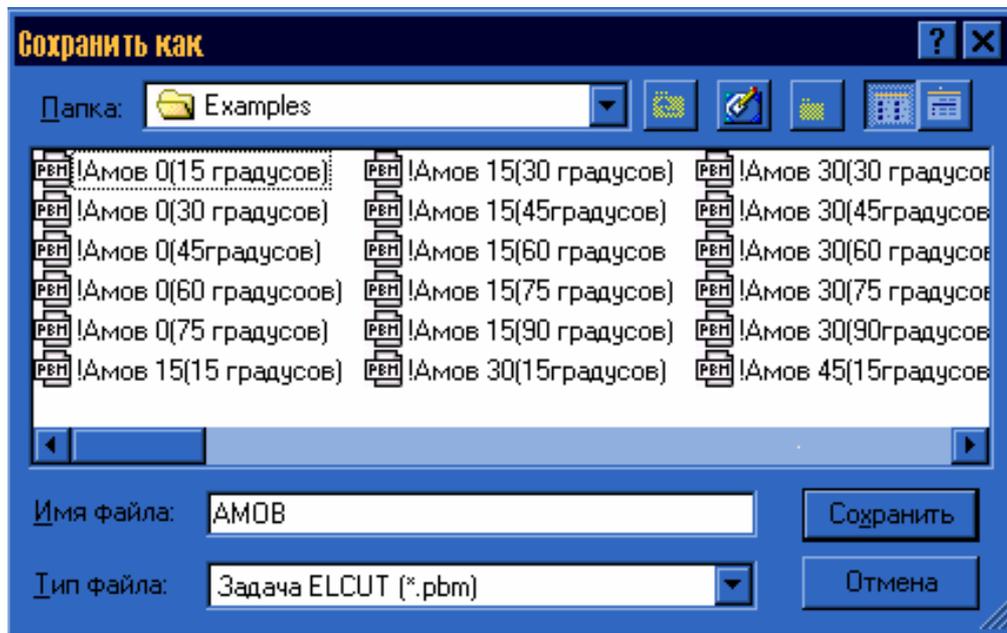


Рисунок 3.8 – Окно сохранение документа

Рабочее окно программы ELCUT состоит из меню, ряда функциональных клавиш, окна структуры и модели задачи (рисунок 3.9).

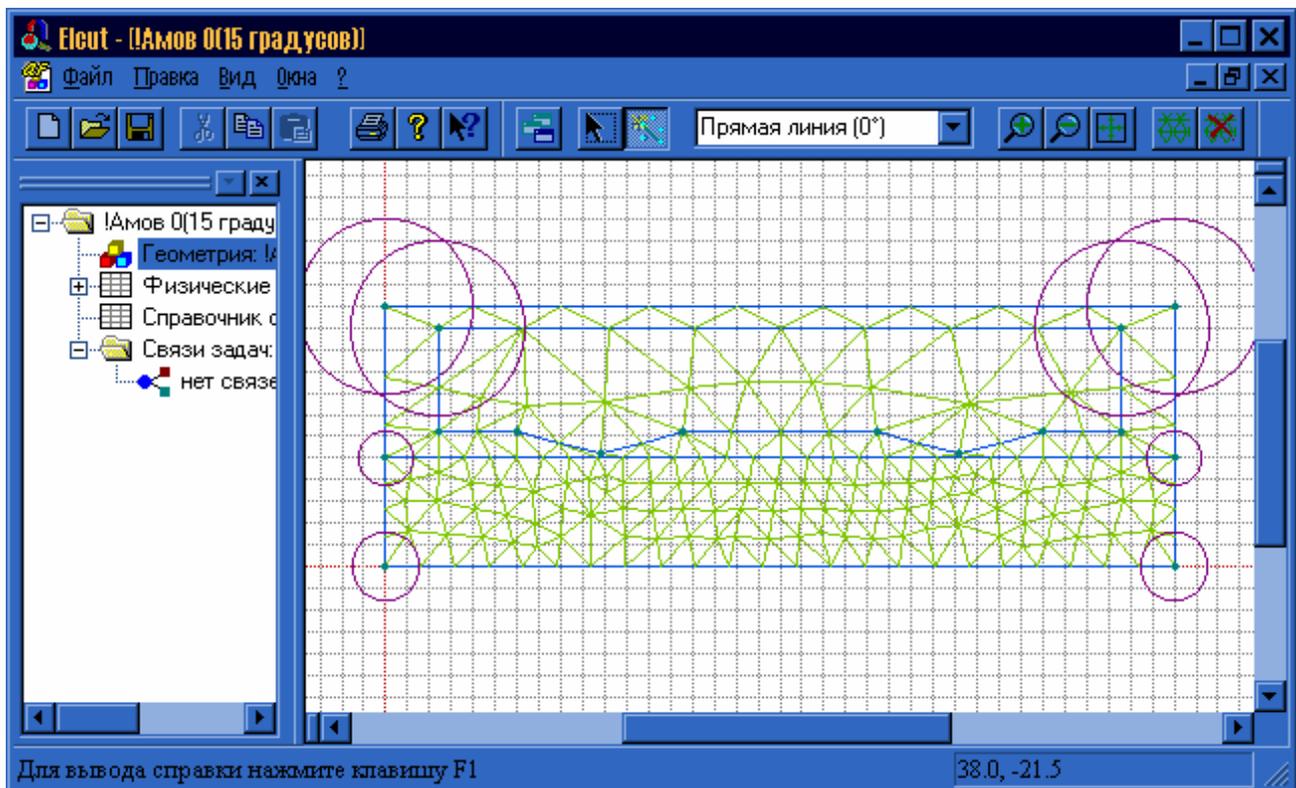


Рисунок 3.9 – Рабочее окно программы ELCUT

3.3.2. Создание геометрического объекта

В программном комплексе ELCUT реализовано создание геометрической модели объекта – для этого используется окно модели.

Геометрическая модель – это один из видов документов ELCUT, который содержит полное описание геометрии задачи. Он содержит различные геометрические объекты и устанавливает связи между ними и свойствами материалов, источниками поля и граничными условиями.

ELCUT предоставляет несколько способов управления изображением модели на экране, которые можно использовать, чтобы изображение было максимально удобным для выполняемой в данный момент работы:

- Масштабирование изображения;
- Видимость деталей модели;
- Сетка привязки.

Можно также открыть несколько окон для одной и той же модели, выбирая в каждом из них разный масштаб и степень детализации изображения. Для этого, выбирается команда «Новое окно» в меню «Окна», или соответствующая кнопка на панели инструментов. Для различных манипуляций с окнами можно использовать соответствующие функции в меню «Окна» (рисунок 3.10).

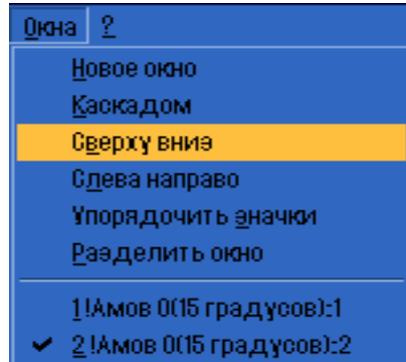


Рисунок 3.10 – Меню задания свойств окон

Чтобы сделать изображение более крупным:

1. Нажимается кнопка «Крупнее» на панели инструментов модели;
2. Перемещается мышь с нажатой кнопкой так, чтобы интересующая область, которая затем займет все окно модели, оказалась внутри получившейся рамки.

Чтобы увидеть более обширную часть модели:

- Нажимается кнопка «Мельче» на панели инструментов модели;
- Или, же кнопка «Показать все» на панели инструментов, чтобы увидеть модель целиком, так крупно, как это возможно.

Вершина, ребро и блок – это три основных типа геометрических объектов, из которых строится модель в системе ELCUT. Рассмотрим более подробно эти понятия.

Вершина – это точка на плоскости, координаты которой введены пользователем или вычислены автоматически как результат пересечения ребер. Для каждой вершины можно задать шаг дискретизации и метку. Величина шага дискретизации задает примерное расстояние между соседними узлами сетки конечных элементов поблизости от данной вершины. Метка используется, например, для задания линейного источника поля или нагрузки.

Ребро – отрезок прямой или дуга окружности, соединяющая две вершины и не пересекающая другие ребра модели. Если новая создаваемая сторона проходит через существующую вершину, то будут созданы два новых ребра, соединенные в данной вершине. Если новое ребро пересекает существующие стороны, то все точки пересечения станут вершинами, а пересекающиеся ребра будут разбиты на части. В качестве первого шага при дискретизации области ребра разбиваются на элементарные отрезки в соответствии с шагами, заданными в вершинах. Ребру может быть присвоена метка, например, для описания краевого условия.

Блок – непрерывная, возможно неодносвязная область, граница которой образована ребрами и, возможно, изолированными вершинами. Блок может содержать отверстия, образованные замкнутыми или разомкнутыми цепочками ребер или изолированными вершинами. Для описания физических свойств среды каждому блоку, входящему в расчетную область, должна быть присвоена метка. Помимо описания свойств среды, метки блоков также используются для задания распределенных источников поля. Сетка конечных элементов создается в каждом блоке автоматически или с учетом шага дискретизации, заданного в отдельных вершинах. В непомеченных блоках расчет поля не производится независимо от того, построена ли в них сетка конечных элементов.

Метка – текстовая строка длиной от 1 до 16 символов, служащая для установления соответствия между геометрическими элементами модели и приписанными им физическими параметрами. Допускаются произвольные печатные символы, включая русские и латинские буквы, цифры, знаки препинания, пробел и другие символы. Не допускаются символы «*» и «?», метка не может начинаться с пробела, а пробелы в конце метки игнорируются. Заглавные и прописные буквы считаются различными.

Шаг дискретизации – имеющая размерность длины величина, сопоставленная вершине модели и задающая густоту сетки в прилегающей области. Задавая шаги дискретизации, можно управлять густотой сетки конечных элементов и, тем самым, точностью решения в тех или иных частях расчетной области.

Обычно, создание модели реализуется в три этапа:

- Ввод геометрических объектов и манипуляция ими;
- Задание свойств, источников поля и граничных условий;
- Построение сетки конечных элементов.

Описывая геометрию модели, задаются вершины и ребра, ограничивающие подобласти (блоки) с различными физическими свойствами. Можно создавать новые вершины и ребра, перемещать, дублировать и удалять любые геометрические объекты. Для выполнения операций над несколькими объектами одновременно, можно использовать механизм выделения.

Чтобы создать новые вершины, необходимо выполнить следующие операции:

1. Выбирается команда «Режим вставки» в меню «Правка» или в контекстном меню (правая кнопка мыши), либо можно нажать клавишу INS для перехода в режим «вставки» (рисунок 3.11).
2. Убедится, что текущие параметры сетки привязки подходят для ввода координат узлов, которые будут создаваться.
3. Используя мышь или клавиши ДВИЖЕНИЯ КУРСОРА, помещается курсор в то место, где должна появиться новая вершина, и дважды необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши или нажать клавишу ENTER.
4. Необходимо выключить «Режим вставки», когда заканчивается работа по созданию объектов - иначе можно легко создать нежелательные объекты!

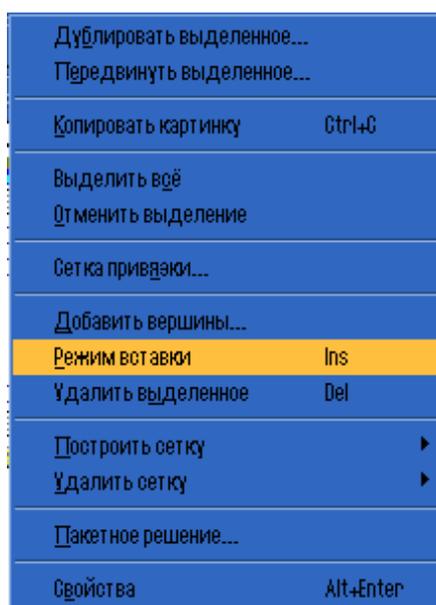


Рисунок 3.11 – Окно правки объекта

Для создания линии можно воспользоваться вторым способом:

1. Выбрать пункт «Добавить вершины» в меню «Правка» (рисунок 3.12).
2. Ввести координаты новой вершины и нажать кнопку «Добавить». Повторять это необходимое количество раз.
3. Нажать кнопку «Закреть».

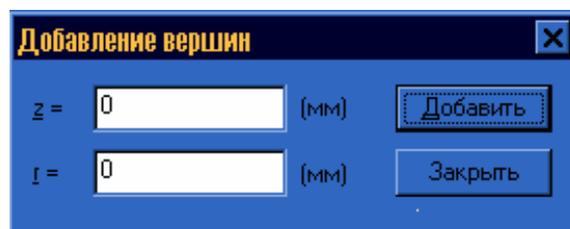


Рисунок 3.12 – Окно добавления вершин

Чтоб создать новые ребра необходимо:

1. Выбрать команду «Режим вставки» в меню «Правка» или в контекстном меню (правая кнопка мыши), либо нажмите клавишу INS для перехода в «Режим вставки».
2. Использовать выпадающий список в панели инструментов модели для выбора типа новых ребер (отрезок или дуга) и угол раствора дуги. Можно использовать имеющиеся в списке величины углов или ввести любое другое значение; нулевой угол обозначает отрезок прямой (рисунок 3.13).
3. Переместить курсор от начальной к конечной точке создаваемого ребра с помощью передвижения мыши, удерживая нажатой ее левую кнопку, либо с помощью клавиш ДВИЖЕНИЯ КУРСОРА при нажатой клавише SHIFT. Можно использовать существующие вершины в качестве концов нового ребра либо создавать новые вершины заодно с созданием ребра. Если включен режим привязки к сетке, новые вершины могут быть созданы только в узлах координатной сетки.
4. Необходимо выключить «Режим вставки», когда заканчивается работа по созданию объектов - иначе можно легко создать нежелательные объекты!

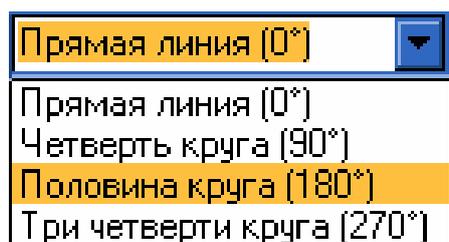


Рисунок 3.13 – Окно выбора формы ребра

Чтобы выделить геометрические объекты необходимо выполнить следующие пункты:

1. Убедиться, что «Режим вставки» выключен.
2. Щелкнуть мышью объекты, которые необходимо выделить, удерживая при этом нажатой клавишу SHIFT или CTRL, или переместить мышь с нажатой левой кнопкой так, чтобы слитно расположенные объекты оказались внутри получившейся рамки. В последнем случае выделенными окажутся только те объекты, которые целиком уместятся внутри рамки.

Можно также использовать команды «Выделить все» и «Отменить выделение» в меню «Правка» или в контекстном меню. Заметим, что можно одновременно выделить объекты разных типов (блоки, ребра или вершины).

Кроме того, когда выделяется одна из меток в окне описания задачи, все геометрические объекты, имеющие эту метку, становятся выделенными (рисунок 3.14).

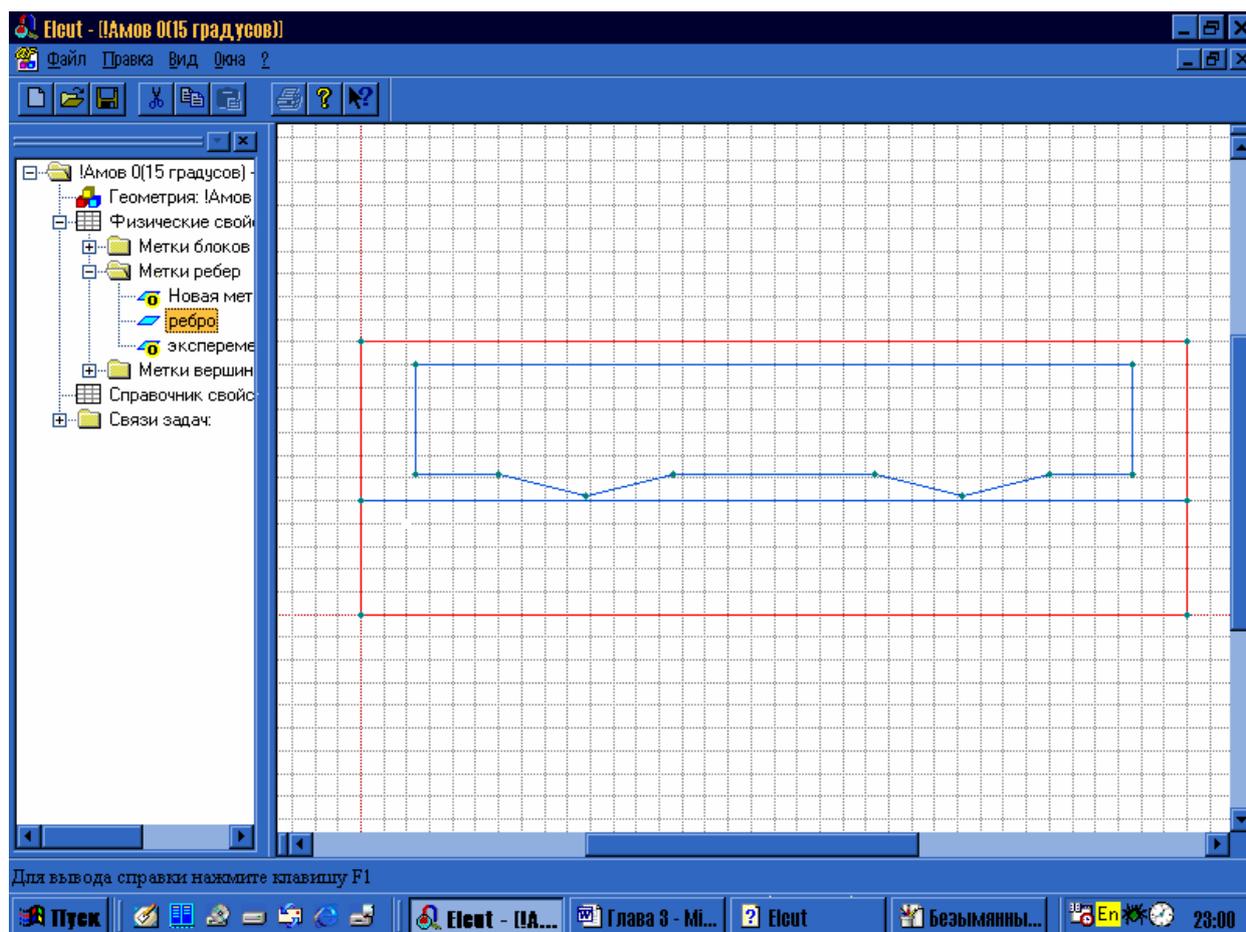


Рисунок 3.14 – Выделение ребер объединенных в одну группу

Копирование и перемещение геометрических объектов

Повторяющиеся геометрические объекты легко могут быть созданы путем копирования или перемещения любого набора объектов на новом месте. Чтобы сделать копию (продублировать объекты) необходимо:

1. Выделить любое количество объектов (блоков, ребер и вершин), которые необходимо скопировать.
2. Выбрать команду «Дублировать выделенное» в меню «Правка» или контекстном меню. Появится диалог для ввода параметров геометрической трансформации (рисунок 3.15).
3. Выбрать метод, ввести его параметры и нажать ОК. Создаваемые объекты появятся на экране, и программа спросит подтверждение на их включение в модель. Таким образом, можно убедиться в правильности ввода параметров.
4. Необходимо нажать кнопку «Yes», чтобы подтвердить копирование. Новые объекты будут встроены в модель, и выделенным окажется последняя их копия.

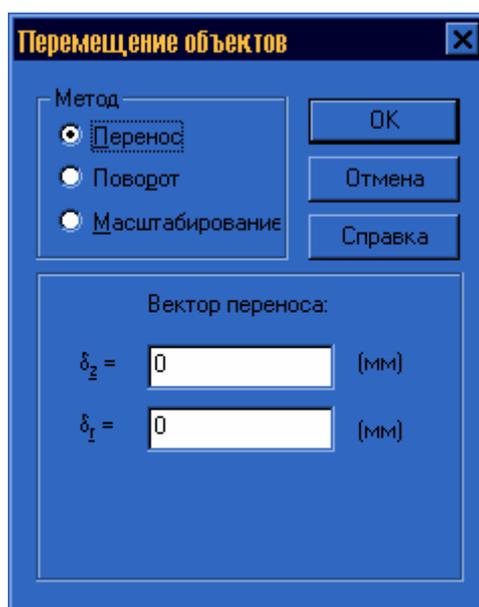


Рисунок 3.15 – Окно перемещение объектов

Операция копирования сохраняет все явно заданные свойства исходных объектов, включая метки и шаги дискретизации. Не копируется только сетка конечных элементов.

Предупреждение! Использовать операцию копирования необходимо с осторожностью, поскольку неверный набор параметров может привести к созданию новых объектов в ненужном месте. Эти ненужные объекты могут накладываться на старые объекты, порождая, тем самым, множество ненужных вершин в местах пересечения ребер. Их последующее удаление может оказаться трудоемким делом.

Можно также переместить выделенные объекты на новое место, соблюдая определенные ограничения: топология области при этом не должна претерпевать изменений и не должно образовываться никаких новых пересечений или соприкосновений. Чтобы переместить выделенные объекты, выберите команду *«Переместить выделенное»* в меню *«Правка»* или в контекстном меню. Появится диалог для ввода параметров геометрической трансформации (рисунок 3.15).

Чтобы удалить геометрические объекты необходимо:

1. Выделить объекты, которые необходимо удалить.
2. Выбрать команду *«Удалить выделенное»* в меню *«Правка»* или в контекстном меню.

Если выделены только вершины и удаляемая вершина является точкой соприкосновения ровно двух сторон, которые могут рассматриваться как одна после удаления этой вершины, стороны соединяются воедино. Иначе программа запрашивает подтверждение на удаление всех сторон, примыкающих к удаляемой вершине.

3.3.3 Задание свойств объекта и решение задачи

Соответствие между геометрическими элементами модели и приписанными им свойствами материалов, граничными условиями и источниками поля устанавливается с помощью меток.

Чтобы присвоить метку объекту необходимо:

1. Выделить объект.
2. Выбрать команду *«Свойства»* в меню *«Правка»* или контекстном меню.
3. Введите имя метки и нажмите ОК.

Если одновременно выделить объекты разного типа, то можно задать метки для объектов каждого типа (блоки, ребра или вершины) отдельно, пользуясь разными вкладками окна свойств.

Задание свойств для выделенных объектов

Чтобы задать свойства выделенных объектов, необходимо:

1. Выделить объект.
2. Выбрать команду *«Свойства»* в меню *«Правка»* или контекстном меню (рисунок 3.16).
3. Для просмотра свойств можно воспользоваться клавишами ALT+ENTER или двойным щелчком мыши

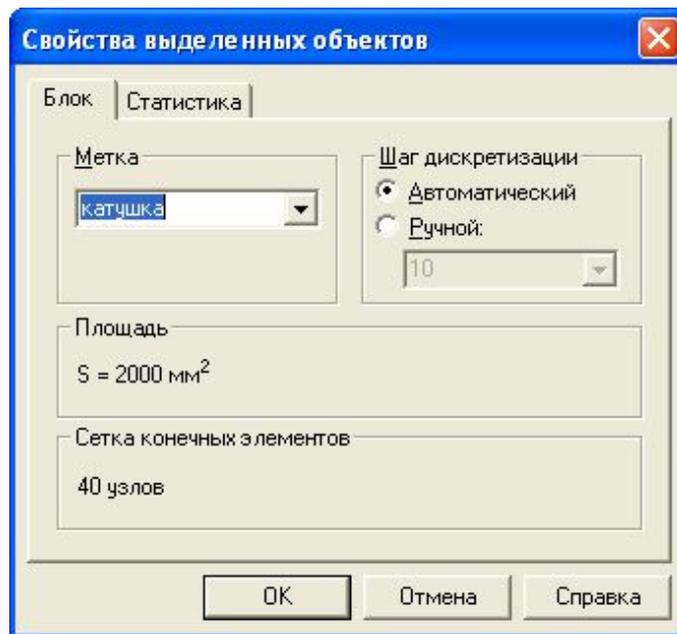


Рисунок 3.16 – Окно свойства выделенного объекта

Создание свойств блоков

Для того, чтобы создать свойства нового блока, необходимо в окне структуры задачи вызвать контекстное меню при помощи правой клавиши мыши, предварительно поместив курсор на папке «*Метки блоков*». Затем выбирается пункт «*Создать метку*» (рисунок 3.17).

В свойствах метки блока задается ряд компонентов (рисунок 3.18):

- Магнитная проницаемость (абсолютная, относительная).
- Полный ток или плотность тока.
- Коэрцитивная сила магнита.
- Выбор координат.

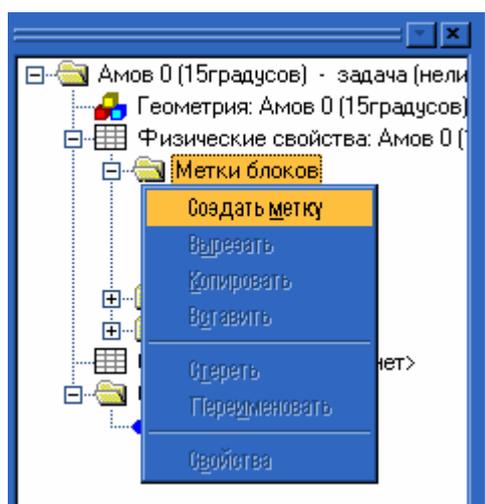


Рисунок 3.17 – Создание новой метки блока

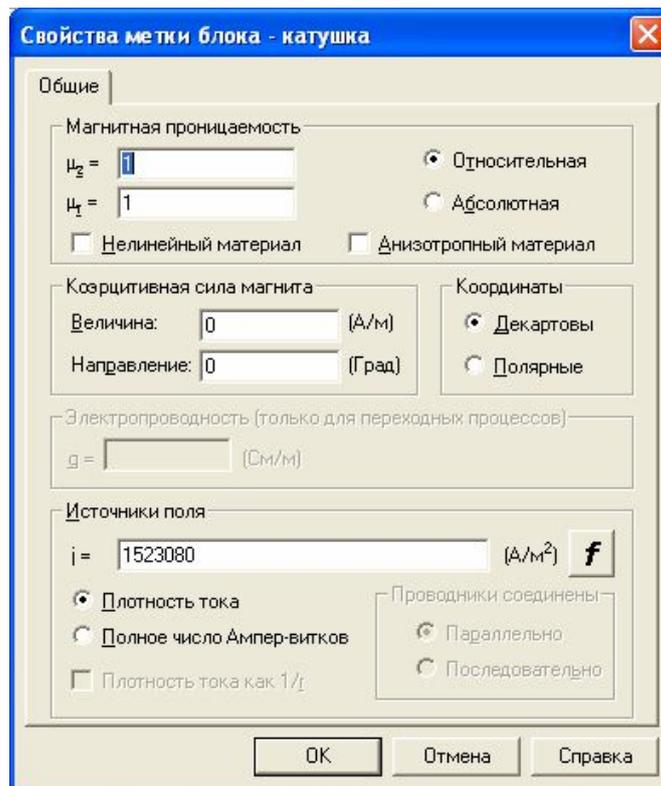


Рисунок 3.18 – Окно свойства метки блока

В ферромагнитных материалах необходимо задать кривую намагничивания вместо магнитной проницаемости (рисунок 3.19).

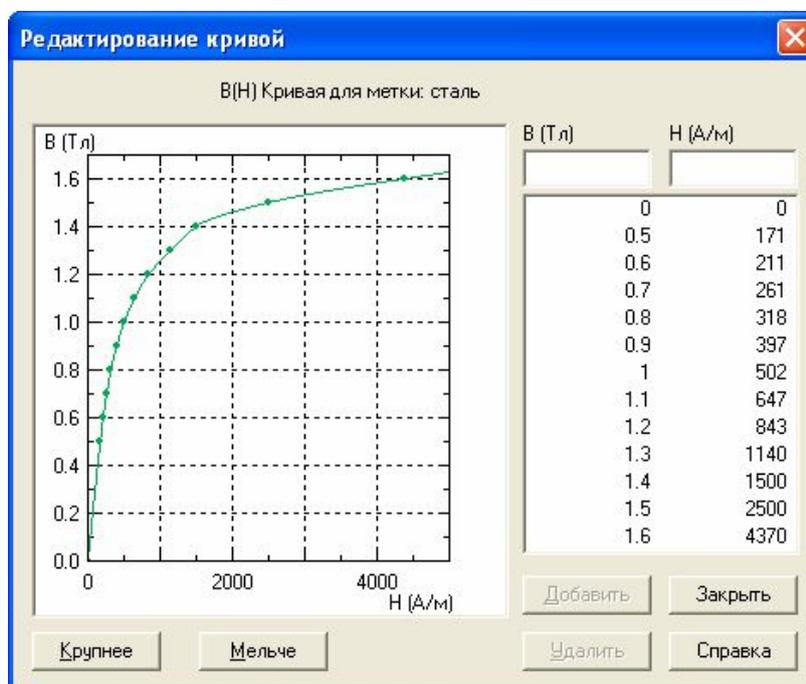


Рисунок 3.19 – Окно редактирования кривой намагничивания

Создание свойств метки ребра

Для того, чтобы создать свойства нового ребра, необходимо в окне структуры задачи вызвать контекстное меню при помощи правой клавиши мыши, предварительно поместив курсор на папке «Метки ребер». Затем выбирается пункт «Создать метку».

В свойствах метки ребра задается ряд компонентов (рисунок 3.20):

- Магнитный потенциал: $A = A_0$.
- Касательное поле: $H_t = \sigma(\Delta H_t = \sigma)$.
- Нулевой нормальный поток: $B_n = 0$.

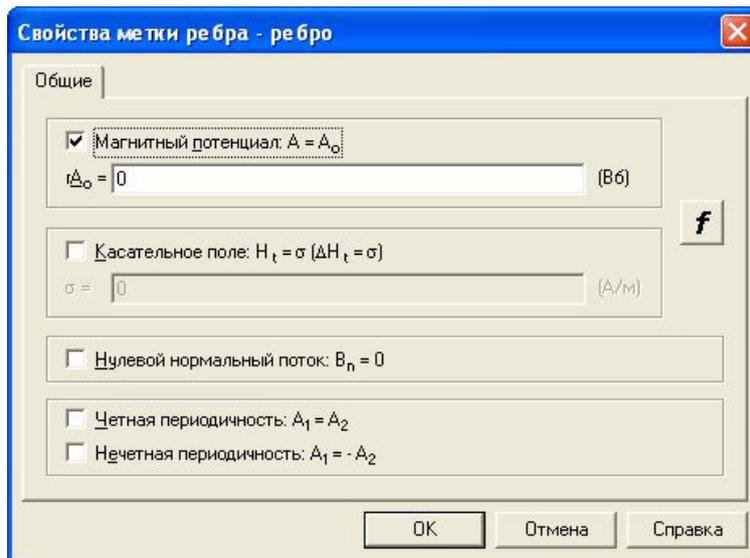


Рисунок 3.20 – Свойства метки ребра

Свойства «Метки ребра» задаются для одного из возможных граничных условий. Условие Дирихле, задается на части границы наперед известный векторный магнитный потенциал A_0 в вершине или на ребре модели. Это граничное условие определяет поведение нормальной составляющей индукции на границе. В программе ELCUT условие Дирихле задается как функция координат в виде:

$$A_0 = a + bx + cy - \text{для плоских задач,}$$

$$rA_0 = a + b zr + cr^2/2 - \text{для осе симметричных задач.}$$

Константы a, b и c постоянны в пределах стороны, но могут и меняться от одной части границы к другой.

После описания геометрии объекта необходимо построить конечно-элементную сетку. Густота сетки непосредственно влияет на точность решения в тех или иных частях расчетной области. Сетка делается особенно густой в местах, где необходимо получить большую точность. Гус-

тота сетки управляется заданием шагов дискретизации в вершинах. Шаг дискретизации определяет расстояние между соседними узлами сетки в окрестности данной вершины (рисунок 3.21).

Чтобы построить сетку конечных элементов необходимо:

- Выбрать команду «*Построить сетку*» в меню «*Правка*» или в контекстном меню. Затем выберите подходящий вариант в подменю.
- Нажать кнопку «*Построить сетку*» на панели инструментов модели. В этом случае, часть модели, в которой будет построена сетка, выбирается в следующем порядке:
 - Выделенные блоки, если они есть;
 - Помеченные блоки, если они есть;
 - Все блоки модели.

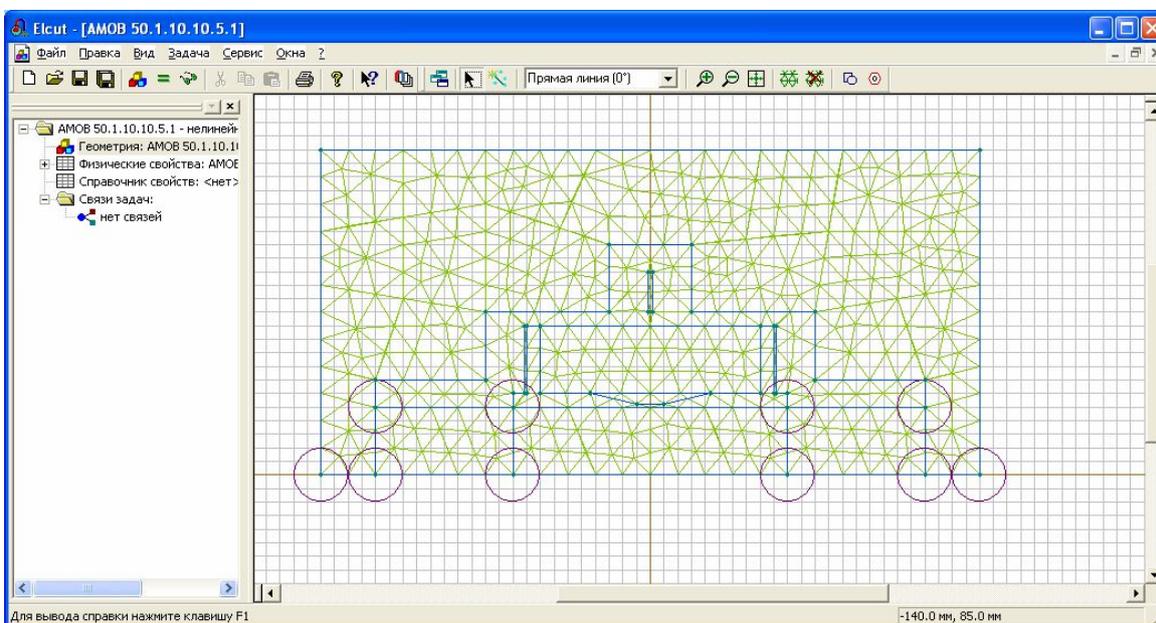


Рисунок 3.21 – Сетка конечных элементов

Управление видимостью дискретизации модели

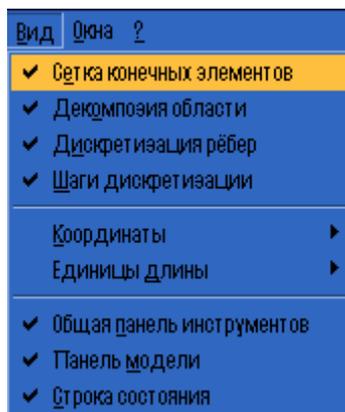


Рисунок 3.22 – Окно управления дискретизацией

Для управления видимостью дискретизации модели необходимо воспользоваться меню «Вид» содержащий четыре переключателя (рисунок 3.22):

- *Сетка конечных элементов;*
- *Декомпозиция области;*
- *Дискретизация ребер;*
- *Шаги дискретизации.*

Эти переключатели влияют на степень видимости дискретизации. Если все они выключены, то модель изображается без дискретизации. Этот режим удобен при описании модели и расстановке меток.

Если включен один из режимов:

- *Шаги дискретизации* – все явно заданные величины шагов будут изображаться в виде окружностей соответствующего радиуса.
- *Дискретизация ребер* – разбиение сторон изображаются штриховыми метками. Сочетание этих двух режимов удобно при расстановке шагов дискретизации.
- *Сетка конечных элементов* – позволяет видеть сетку треугольников в блоках, где она построена. Этот режим рекомендуется включать при триангуляции блоков.
- Включение режима «*Декомпозиция области*», при выключенном «*Сетка конечных элементов*», показывает подблоки, получающиеся в результате процесса геометрической декомпозиции.

Решение задачи

Для решения задачи необходимо выбрать пункт «*Решить задачу*» в меню, вызванным правой клавишей мыши, предварительно поместив курсор в окно описания задачи (рисунок 3.23).

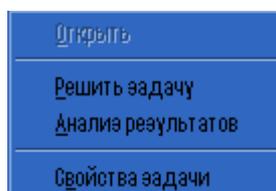


Рисунок 3.23 – Окно решения задачи

После решения задачи на экране появляется картина поля (рисунок 3.24.)

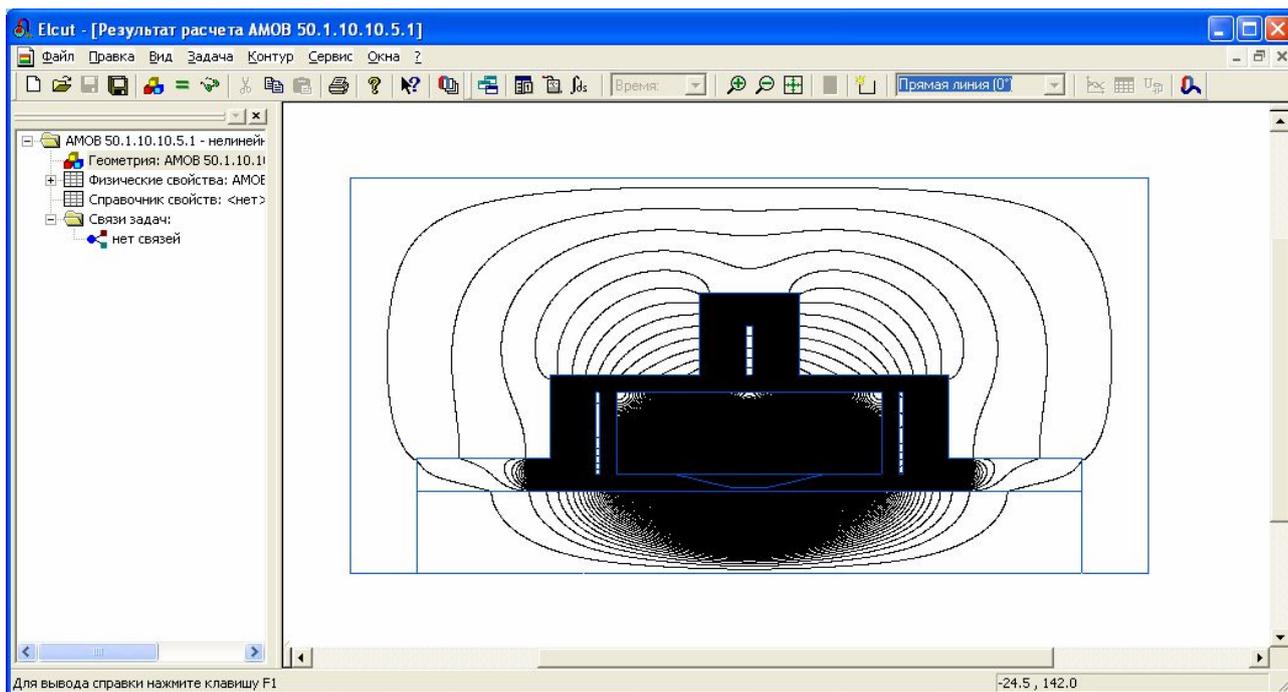


Рисунок 3.24 – Картина поля

3.3.4 Анализ полученных данных

Работа с картиной поля

Когда используется команда анализа решения, то ELCUT [77] открывает новое окно, в котором изображается картина вычисленного поля. В этом окне можно:

- При помощи команды «Картина поля» выбрать способы графического представления полевых характеристик, их масштабы и диапазоны.
- Установить масштаб изображения.
- Вывести локальные значения полевых величин в указанных точках.
- Создавать и модифицировать контур.
- Вычислять интегральные характеристики.
- Строить графики.
- Выводить таблицы.

Картина поля может быть скопирована в буфер обмена Windows или сохранена в файле.

Картина поля с цветовой картой оснащается цветовой шкалой.

Можно одновременно работать с несколькими разными картинками поля для одной и той же задачи. Чтобы открыть новое окно, выбирается пункт «Новое окно» в меню «Окна» или можно воспользоваться соответ-

ствующей кнопкой на панели инструментов.

Чтобы задать условия отображения картины поля, необходимо выбрать пункт «Картина поля...» в меню, вызванном правой клавишей мыши, предварительно поместив курсор мыши в область картины поля (рисунок 3.25).

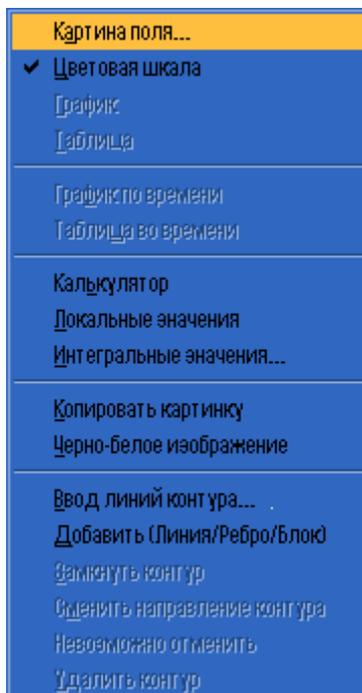


Рисунок 3.25 – Окно выбора операций

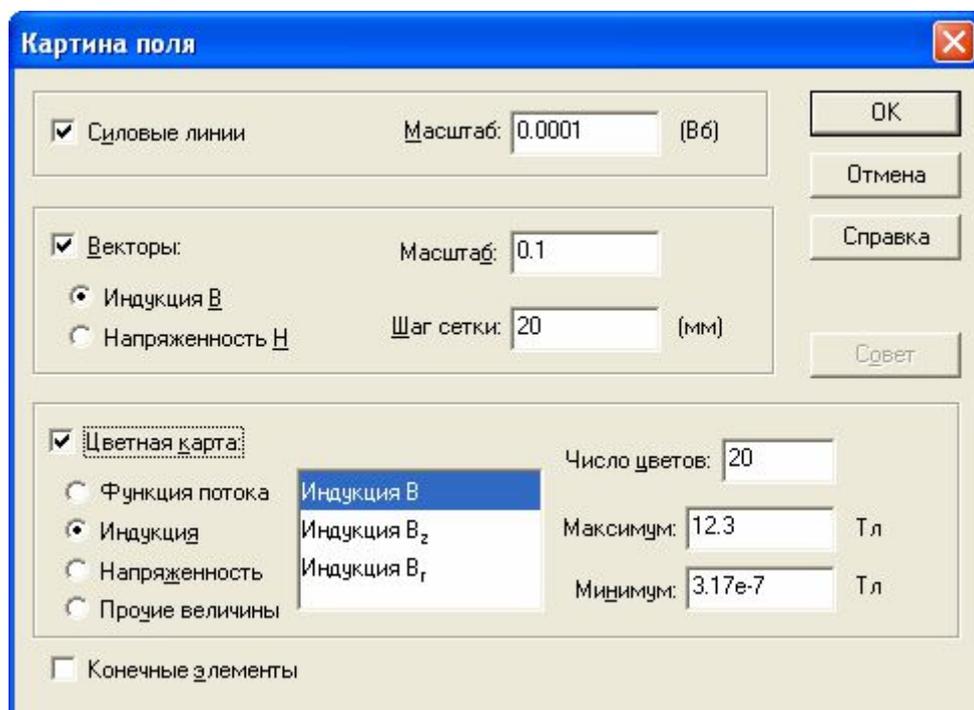


Рисунок 3.26 – Окно параметров картины поля

«Картина поля» в задачах электростатики может отображать ряд па-

раметров (рисунок 3.26):

- «*Силовые линии*» управляет видимостью линий равного потенциала. Необходимо использовать пункт «*Масштаб*» для изменения густоты линий.
- «*Векторы*» показывают величину и направление электрического поля (напряженности или электрического смещения) в виде семейства направленных отрезков.
- «*Цветная карта*» изображает пространственное распределение выбранной величины.
- При вводе любого из масштабных параметров можно воспользоваться кнопкой «*Совет*», которая подскажет стандартное значение параметра, вычисленное для наилучшего показа видимой части области.

Изменение масштаба

Чтобы сделать изображение крупнее, необходимо:

1. Нажать кнопку «*Крупнее*» на панели инструментов.
2. Перемещая мышь с нажатой левой кнопкой, выделить прямоугольник, который после отпускания кнопки займет окно целиком.

Чтобы увидеть более обширную часть модели, необходимо:

1. Нажать кнопку «*Мельче*» на панели инструментов модели.
2. Или, нажать кнопку «*Показать все*» на панели инструментов, чтобы увидеть модель целиком, так крупно, как это возможно.

Просмотр локальных значений

Чтобы получить значения физических величин, характеризующих

поле в указанных точках, необходимо щелкнуть значок  на панели инструментов или выбрать команду «*Локальные значения*» в меню «*Вид*» или в контекстном меню окна «*Картинки поля*».

Если панель калькулятора уже открыта, дважды щелкните метку «*Локальные значения*» в дереве. Появится сообщение, приглашающее пользователя указать мышью точку, в которой необходимо узнать значения поля.

Теперь можно щелчком мыши указывать точки, в которых нужно узнать значения физических величин. Содержимое окна локальных значений обновляется с каждым щелчком. Объемом информации в окне можно управлять двойным щелчком на строки, являющиеся заголовками для других, детализирующих строк (рисунок 3.27).

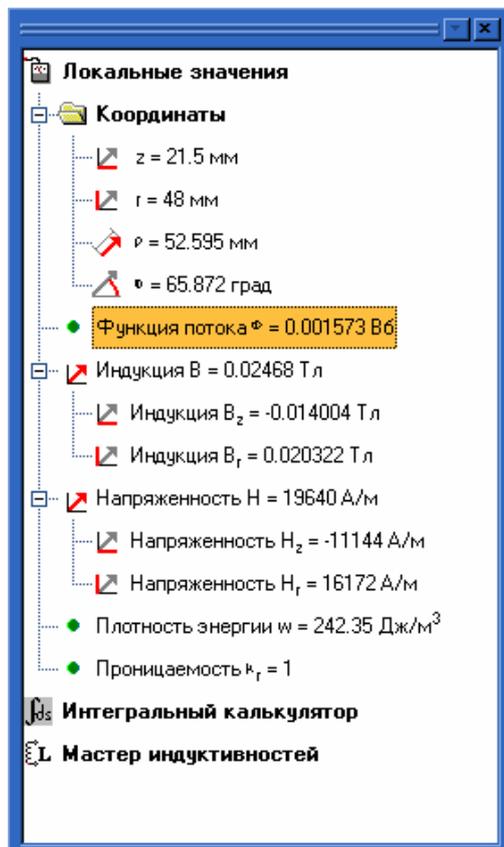


Рисунок 3.27 – Окно локальных значений

Чтобы завершить режим, закройте окно локальных значений или выберите команду «Локальные значения» еще раз.

Значения физических величин, показываемые в окне, обеспечивают дополнительные возможности управления:

- Чтобы ввести координаты пробной точки с клавиатуры, выбирается мышью любое из значений координат и затем необходимо щелкнуть по нему мышью еще раз (через некоторый промежуток времени, чтобы не спутать это действие с двойным щелчком мыши). Можно вводить декартовы или полярные координаты.
- Двойной щелчок мышкой над названием физической величины высвечивает цветную карту ее распределения в окне «Картинки поля».
- Можно отметить одну или несколько строк в окне (не обязательно подряд) и экспортировать их в другую программу (например, текстовый процессор или электронную таблицу).
- Содержимое окна локальных значений может быть скопировано в буфер обмена, например, для вывода на печать или для передачи в другую программу. Для этого необходимо воспользоваться командой «Копировать» в буфер в контекстном меню. Чтобы увидеть и скопировать ровно те строки, которые необ-

ходимо, пользователь может раскрывать и свертывать отдельные ветви дерева значений.

- Контекстное меню окна значений обеспечивает также быстрый доступ к некоторым органам управления картиной поля, которые обычно используются в диалоге «*Картина поля*».

Панель калькулятора

Панель калькулятора обычно причалена к левому краю окна картины поля.

Чтобы открыть панель калькулятора, необходимо щелкнуть значок



на панели инструментов или выбрать команду «*Калькулятор*» в меню «*Вид*». Панель калькулятора также откроется при выборе команд «*Локальные значения*», «*Интегральные значения*» или «*Мастер*» в меню «*Вид*».

Панель калькулятора организована в виде нескольких деревьев, корневые элементы которых соответствуют различным видам числовых данных. Среди них:



– *Локальные значения* отображают различные полевые характеристики в указанных пользователем точках расчетной области;



– *Интегральный калькулятор* перечисляет характеристики, которые могут быть вычислены интегрированием по заданной линии, поверхности или объему;



– *Мастер индуктивности* запускает мастер, который поможет вычислить собственную или взаимную индуктивность катушек или проводников;



– *Мастер емкости* запускает мастер, который проведет пользователя через этапы, необходимые для вычисления собственной или взаимной емкости проводников в задачах электростатики;



– *Мастер импеданса* запускает мастер, позволяющий вычислить импеданс (комплексное сопротивление переменному току) проводника в задачах магнитного поля переменных токов.

Чтобы открыть перечисленные наборы числовых данных, необходимо дважды щелкнуть мышью соответствующий заголовок в дереве или выбрать его и нажать ENTER.

Панель калькулятора изначально причалена к левому краю окна картины поля. Чтобы изменить его ширину, необходимо отбуксировать влево или вправо серую полосу, отделяющую панель от остального окна.

Можно причалить панель к правому краю окна картины поля, или сделать его плавающим, как обычное окно. Для этого необходимо щелкнуть заголовок окна и оттащить его в нужное место.

Можно выделить одну или несколько строк в панели калькулятора (не обязательно подряд) и отбуксировать их в любую программу, поддерживающую интерфейс «перетащить-и-сбросить» (практически любой текстовый процессор или электронная таблица). Можно также пользоваться контекстным меню (правая кнопка мыши). Оно предоставляет удобное подмножество команд для манипулирования картиной поля в соседнем окне.

В нестационарных задачах все величины в интегральном калькуляторе посчитаны для того момента времени, в котором отображается картина поля.

Вычисляемые физические величины в магнитостатике

При анализе результатов расчета магнитного поля ELCUT позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами.

Локальные величины:

- Векторный магнитный потенциал \bar{A} (функция потока rA в осесимметричном случае);
- Вектор магнитной индукции $\bar{B} = rot\bar{A}$
– для плоскопараллельного поля

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x},$$

– для осесимметричного поля;

$$B_x = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}, \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}.$$

- Вектор напряженности магнитного поля

$$H = \mu^{-1} B,$$

где μ – тензор магнитной проницаемости.

Интегральные величины:

- Суммарная магнитостатическая сила, действующая на тела, заключенные в заданном объеме

$$F = \frac{1}{2} \oint (H(n \cdot B) + B(n \cdot H) - n(H \cdot B)) \partial s,$$

где интегрирование ведется по поверхности окружающей заданный объем, а n – единичный вектор внешней нормали к поверхности;

- суммарный момент магнитостатических сил, действующих на тела, заключенные в заданном объеме

$$T = \frac{1}{2} \oint ((r \times H)(n \cdot B) + (r \times B)(n \cdot H) - (r \times n)(H \cdot B)) ds,$$

где r – радиус-вектор точки интегрирования. В плоскопараллельном случае вектор момента направлен параллельно оси z , в осесимметричном случае момент тождественно равен нулю. Момент вычисляется относительно начала координат. Момент относительно произвольной точки с радиус-вектором r_0 может быть получен добавлением векторного произведения $F \times r_0$, где F это полная сила, а r_0 – радиус-вектор точки.

- Энергия магнитного поля:
 - в линейном случае;

$$W = \frac{1}{2} \int (H \cdot B) dV,$$

- в нелинейном случае.

$$W = \int \left(\int_0^B H(B') dB' \right) dV.$$

- Потокосцепление на один виток обмотки:
 - в плоскопараллельном случае;

$$\Psi = \frac{\oint A ds}{S},$$

- в осе симметричном случае;

$$\Psi = \frac{2\pi \oint r A ds}{S}.$$

Интегрирование в данной формуле ведется по поперечному сечению обмотки; а S обозначает площадь этого поперечного сечения.

Для плоских задач все интегральные величины рассматриваются на

единицу длины в осевом направлении.

Область интегрирования задается в плоскости модели в виде контура (при необходимости замкнутого), состоящего из отрезков и дуг окружностей.

Работа с контуром

Контур – направленная ломаная линия, состоящая из отрезков прямых и дуг окружностей (включая ребра модели). Контур используется для построения графиков и вывода таблиц, а также для вычисления интегральных характеристик.

Правила, действующие для контуров:

- Контур не может пересекать сам себя.
- Замкнутые и разомкнутые контуры различаются.
- Замкнутые многосвязные контуры используются только для вычисления интегралов.

Контур изображается при помощи направленных отрезков и дуг, либо, если он замкнут и положительно ориентирован (против часовой стрелки) - в виде залитого цветом многоугольника.

ELCUT позволяет создавать и модифицировать контур в окне картины поля. Для работы с контуром используются следующие операции:

- Добавление линий присоединяет отрезок прямой или дугу окружности к контуру. Дуга задается своим угловым размером, (нулевой угол обозначает отрезок) и двумя концевыми точками. Контур может начинаться любой линией. К существующему контуру можно добавить линию, начинающуюся в конце предыдущей. Нельзя добавить линию к замкнутому контуру. Есть два способа добавления линий к контуру:
 1. Необходимо выбрать команду «*Добавить (...Линия...)*» из меню «*Контур*» или контекстного меню и затем перемещать мышь с нажатой левой кнопкой к концу будущей линии (рисунок 3.28).

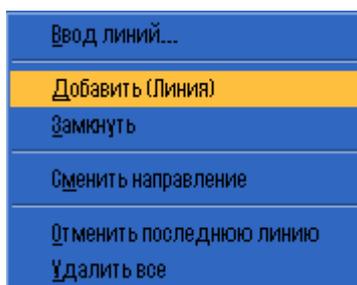


Рисунок 3.28 – Меню редактирования контура

2. Выбрать команду «*Ввод линий*» из меню «*Контур*» или контек-

стного меню и ввести координаты концевых точек и угловой размер дуги с клавиатуры.

- Добавление ребер – добавляет ребро модели к контуру. Контур может начинаться любым ребром. К существующему контуру можно добавить ребро, начало которого совпадает с концом контура. Ребро не может быть добавлено, если контур замкнут или если конечная точка контура не является вершиной модели.
- Чтобы добавить ребра, необходимо выбрать команду «*Добавить (...Ребро...)*» в меню «*Контур*» или контекстном меню и затем указать мышью примыкающие друг к другу ребра.
- Добавление блоков рассматривая текущий замкнутый контур как границу некоторой области, добавляет к ней (или вычитает из нее) блок модели в теоретико-множественном смысле.

Чтобы добавить блок, необходимо выбрать команду «*Добавить (...Блок...)*» из меню «*Контур*» или контекстного меню и затем указать мышью нужные блоки.

- Замкнуть контур – соединяет начало и конец разомкнутого контура отрезком или дугой, в зависимости от текущего значения угла раствора дуги на панели инструментов.
- Сменить направление – изменяет направление контура на противоположное.
- Удалить все – удаляет контур целиком.
- Отменить последнее – удаляет последний добавленный элемент (линию или ребро). Не применяется к замкнутому многосвязному контуру.

Направление контура имеет значение в следующих случаях:

- При вычислении объемных интегралов область интегрирования берется слева от контура.
- При вычислении поверхностных интегралов положительная нормаль направлена направо от контура.
- Начальная точка контура имеет нулевую координату по оси абсцисс при построении графиков и выводе в таблицу.
- Если изображаемая на графике или интегрируемая величина определена с обеих сторон контура и при этом принимает различные значения слева и справа от него, используется значение с правой стороны.

Вычисление интегралов

После задания контура можно вычислять интегральные характеристики. Для этого необходимо использовать команду «*Интегральные значения*» в меню «*Вид*» или контекстном меню того окна картины поля, в котором уже был построен контур (рисунок 3.29). Или, если панель калькулятора в этот момент открыта, можно дважды щелкнуть строку «*Интегральный калькулятор*».

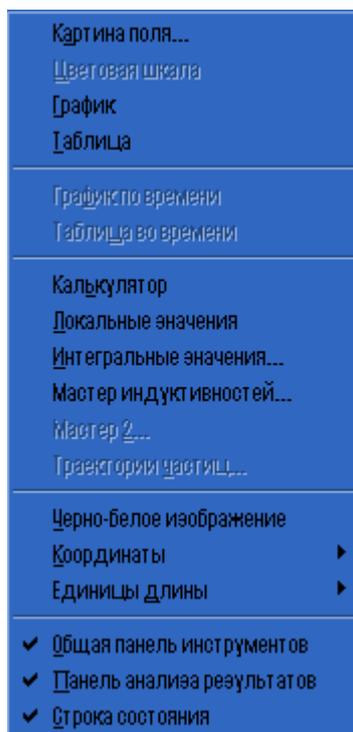


Рисунок 3.29 – Окно меню вид

Если контур интегрирования уже построен, в панели калькулятора появится список имеющихся интегральных характеристик. Этот список будет разным в зависимости от того, замкнут или разомкнут контур. Если контура еще нет, вместо списка появится сообщение, приглашающее пользователя его построить.

Можно увидеть значение интегральной величины, нажав маленькую серую кнопку около его названия или дважды щелкнув само название

. Будучи однажды вычисленным, интегральное значение будет пересчитываться автоматически всякий раз, когда изменяется контур.

ELCUT вычисляет линейные, поверхностные и объемные интегралы. В плоскопараллельных задачах контур определяет цилиндрическую (в обобщенном смысле) поверхность бесконечной длины в направлении оси Z совпадающую с осевым направлением. Для вычисления объемных интегралов используется внутренний объем этого цилиндра. Таким образом, в плоскопараллельных задачах поверхностные и объемные интегралы вы-

числяются на единицу глубины. В осесимметричном случае контур определяет тороидальную поверхность и, соответственно, объем внутри этой поверхности.

Положительным направлением контура считается направление против часовой стрелки. Направление контура учитывается следующим образом:

- Для объемных интегралов область интегрирования лежит слева от контура.
- Для поверхностных интегралов положительный вектор нормали направлен направо от контура.
- Если интегрируемая функция принимает разные значения справа и слева от контура, то используется правое значение.

Такие интегральные величины, как механическая сила, вращающий момент и электрический заряд представляют реальные физические величины, только в том случае, когда контур замкнут. Однако эти интегралы вычисляются также и для незамкнутых контуров, поскольку это может представлять интерес для детального рассмотрения в некоторых ситуациях.

Для вычисления механических сил и моментов в задачах электростатики, магнитостатики, или электрического заряда область интегрирования может быть выбрана многими разными способами. Единственное требование состоит в том, что поверхность, по которой вычисляется интеграл, должна охватывать все нужные тела и не включать никаких ненужных тел или источников поля. Важно иметь в виду, что результат будет наиболее точен, если поверхность интегрирования будет проведена как можно дальше от зон сильной неоднородности поля, таких как источники поля или поверхности проводящих или ферромагнитных тел.

При вычислении потокосцепления, напротив, область интегрирования должна точно совпадать с поперечным сечением нужной обмотки.

Графики

Распределение физических величин поля вдоль контура может быть изображено на графике. Чтобы открыть окно графика, необходимо выбрать команду «График» в меню «Вид» или контекстном меню окна картины поля, в котором уже был задан контур (рисунок 3.29). Так же можно

щелкнуть кнопку . Внешний вид поля графика представлен на рисунке 3.30.

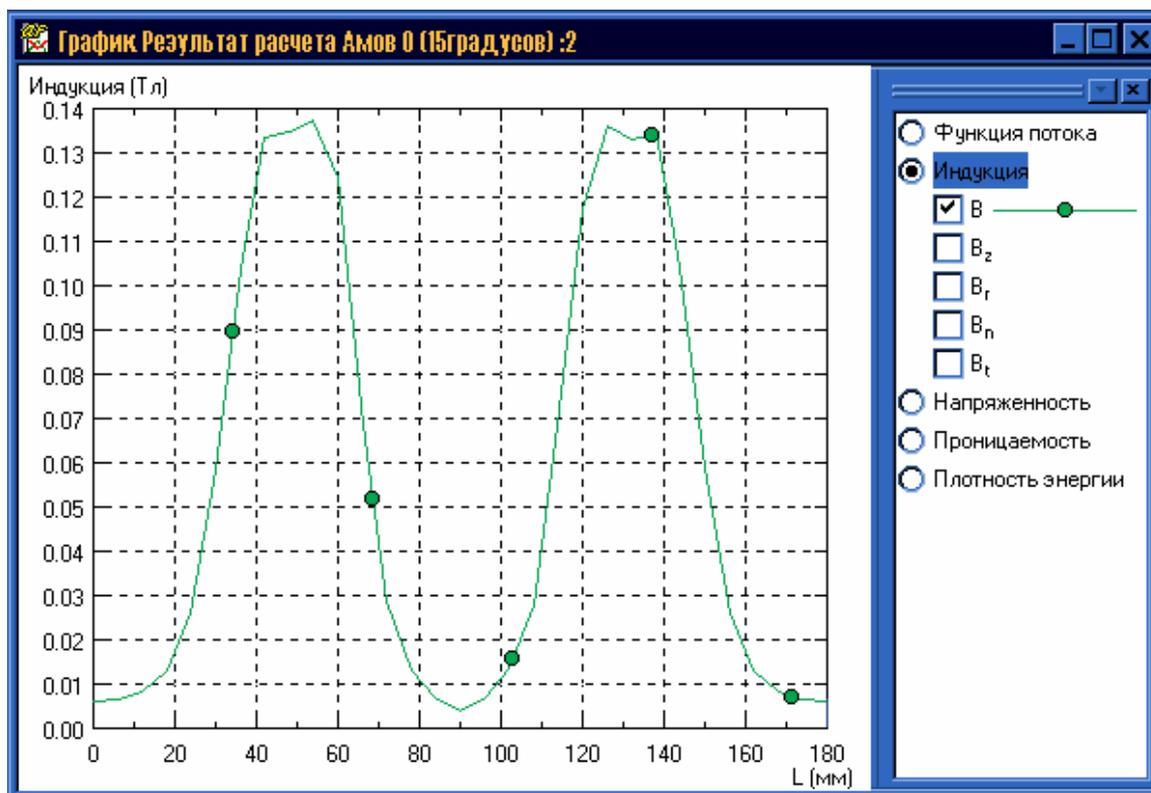


Рисунок 3.30 – Окно графика

В окне графика можно:

- Выбирать набор отображаемых величин при помощи команды «Кривые на графике» из меню «Вид» или контекстного меню (рисунок 3.29).
- Изменять масштаб изображения. Выполняется при помощи кнопок «Крупнее»  и «Мельче» , расположенных на панели инструментов.
- Просматривать таблицу соответствия между цветом кривой на графике и изображаемой физической величиной (легенда) при помощи команды «Обозначения» в меню «Вид» или контекстном меню.
- Копировать изображение из окна графика в буфер обмена при помощи команды «Копировать картинку» в меню «Правка» или контекстном меню.
- Сохранять изображение из окна графика в файле при помощи команды «Экспорт картинки» в меню «Файл».
- Открывать несколько окон графиков для одного контура, пользуясь командой «Новое окно» в меню «Окна» или соответствующей кнопкой на панели инструментов.

На графике могут быть одновременно изображено несколько физических величин с одинаковыми единицами измерения. В соответствии с

этим величины разбиты на группы. Чтобы выбрать изображаемые физические величины в начале необходимо выбрать нужную группу среди Групп величин, а затем использовать кнопку «Добавить (Добавить все)» для выбора изображаемых «Кривых» из списка доступных «Величин».

Можно также вводить значения «Максимум» и «Минимум» диапазона по оси ординат. Для расчета оптимального диапазона из выбранного набора величин используется кнопка «Совет».

Манипулирование флажками «Маркировать» линии и «Показать координатную сетку» позволяют добиться наиболее приемлемого вида графика (рисунок 3.31).

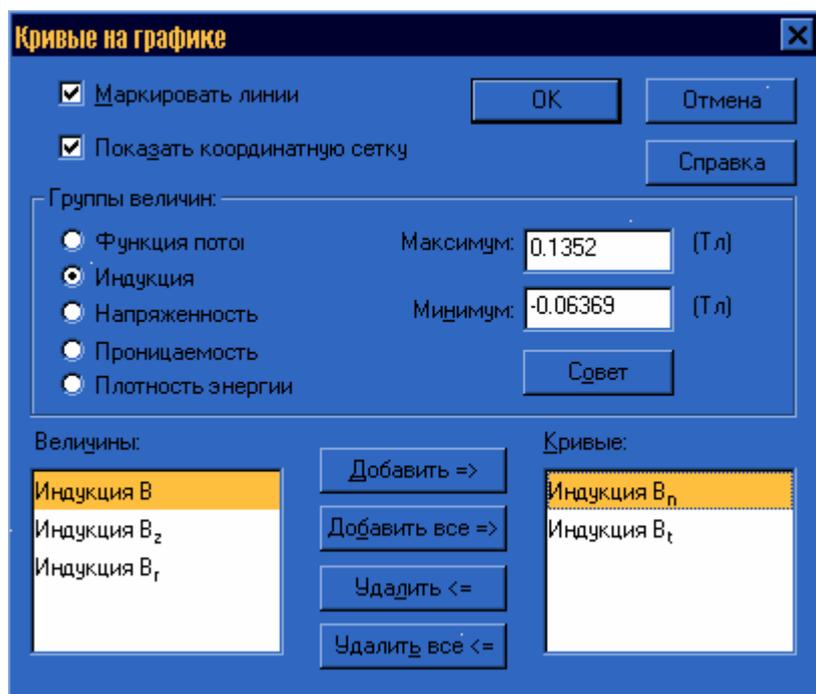


Рисунок 3.31 – Окно редактирования кривых на графике

Вывод результатов в таблицу

ELCUT может выводить в табличной форме полевые величины в точках, распределенных вдоль заданного контура. Чтобы открыть окно таблицы, необходимо выбрать команду «Таблица» в меню «Вид» или в контекстном меню окна картины поля, в котором ранее был создан контур

или нажать кнопку  (рисунок 3.32).

L (мм)	z (мм)	r (мм)	N_x	N_y	Φ (Вб)	V (Тл)	V_z (Тл)	V_r (Тл)
0.00000	0.00000	25.0000	0.00000	-1.00000	0.00000	0.00627582	7.45815e-5	-0.00627537
9.00000	9.00000	25.0000	0.00000	-1.00000	8.99403e-6	0.00750149	0.00225894	-0.00715329
18.0000	18.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.08856e-5	0.0128487	0.00443166	-0.0120603
27.0000	27.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	5.26630e-5	0.0421543	0.0146916	-0.0395113
36.0000	36.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	1.41996e-4	0.103777	0.0820591	-0.0635293
45.0000	45.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.07495e-4	0.133127	0.131687	-0.0195282
54.0000	54.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.09194e-4	0.137177	0.135200	0.0232091
63.0000	63.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	1.22514e-4	0.0920363	0.0665943	0.0635286
72.0000	72.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	4.31334e-5	0.0285755	0.00875387	0.0272017
81.0000	81.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.38256e-5	0.00973927	0.00455431	0.00860881
90.0000	90.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	1.77211e-5	0.00380705	0.00380097	-2.15165e-4
99.0000	99.0000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.34746e-5	0.0100271	0.00487564	-0.00876188
108.000	108.000	25.0000	0.00000	-1.00000	4.24278e-5	0.0280386	0.00922084	-0.0264790
117.000	117.000	25.0000	0.00000	-1.00000	1.19584e-4	0.0893123	0.0636918	-0.0626103
126.000	126.000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.07427e-4	0.135879	0.133664	-0.0244363
135.000	135.000	25.0000	0.00000	-1.00000	2.06709e-4	0.133088	0.131751	0.0188164
144.000	144.000	25.0000	0.00000	-1.00000	0.000142360	0.104256	0.0828099	0.0633383
153.000	153.000	25.0000	0.00000	-1.00000	5.26947e-5	0.0422734	0.0147291	0.0396244

Рисунок 3.32 – Окно таблицы результатов

В окне таблицы пользователь может:

- Выбирать необходимые физические и геометрические величины (столбцы) для включения в таблицу. Для этого используют команду «Столбцы» в меню «Вид» или контекстном меню (рисунок 3.33).

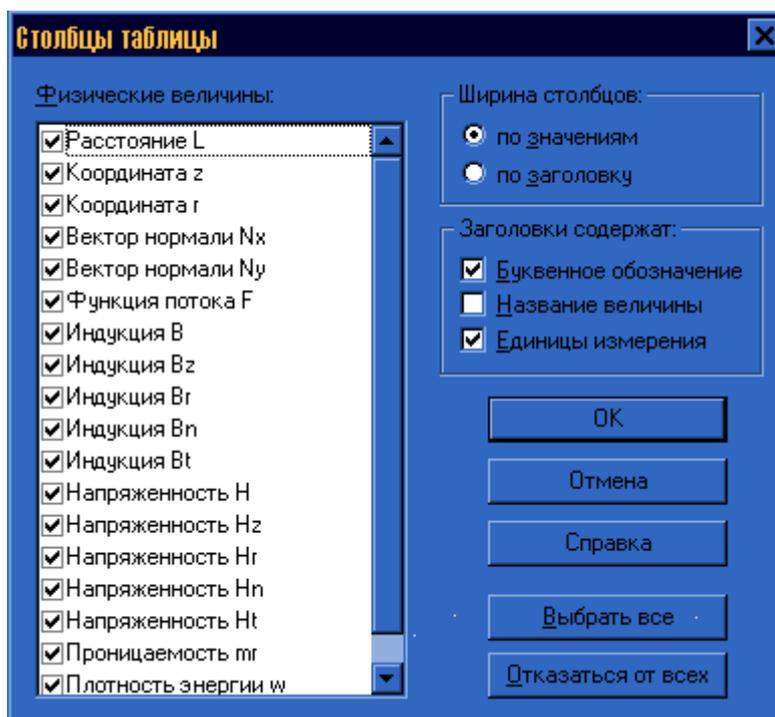


Рисунок 3.33 – Окно редактирования столбцов таблицы

- Управлять текстом заголовка и шириной столбцов.
- Регулировать распределение точек (строк таблицы) вдоль контура. Это выполняется при помощи команды «*Строки*» в меню «*Вид*» или контекстном меню окна таблицы (рисунок 3.34).

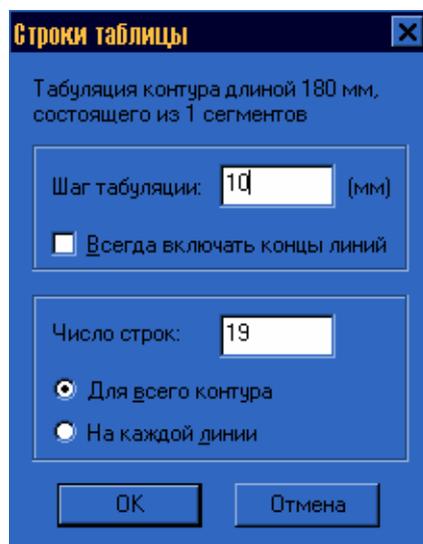


Рисунок 3.34 – Окно редактирования состояния строк

- Добавить дополнительную точку (строку таблицы) на указанном расстоянии от начала контура при помощи команды «*Создать*» в меню «*Правка*» или контекстном меню (рисунок 3.35).

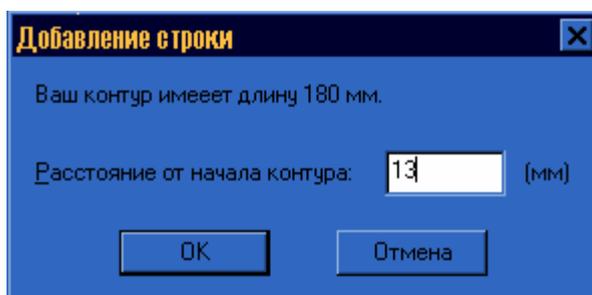


Рисунок 3.35 – Окно добавления строк

- Выделять все или некоторые строки таблицы (слитно или вразброс) для удаления или копирования. Выделение нужных строк можно делать мышью или клавишами движения курсора с нажатой клавишей SHIFT.
- Удалять выделенные строки из таблицы командой «*Удалить*» из меню «*Правка*» или контекстного меню.
- Копировать в буфер обмена выделенные строки или таблицу целиком. В последнем случае (если выделены все строки таблицы) копируются также и заголовки столбцов. Чтобы скопировать только заголовки, необходимо щелкнуть правой кнопкой

кой мыши в какое-нибудь место заголовка и выбрать команду «Копировать заголовок» в появившемся контекстном меню.

Данная функция очень удобна при вставлении данных в программы Microsoft Office!

- Сохранять таблицу в текстовом файле на диске, пользуясь командой «Сохранить как...» в меню «Файл».

Цветовая шкала

Цветовая шкала показывает соответствие между цветом на картине поля и значением физической величины рисунок 3.36.

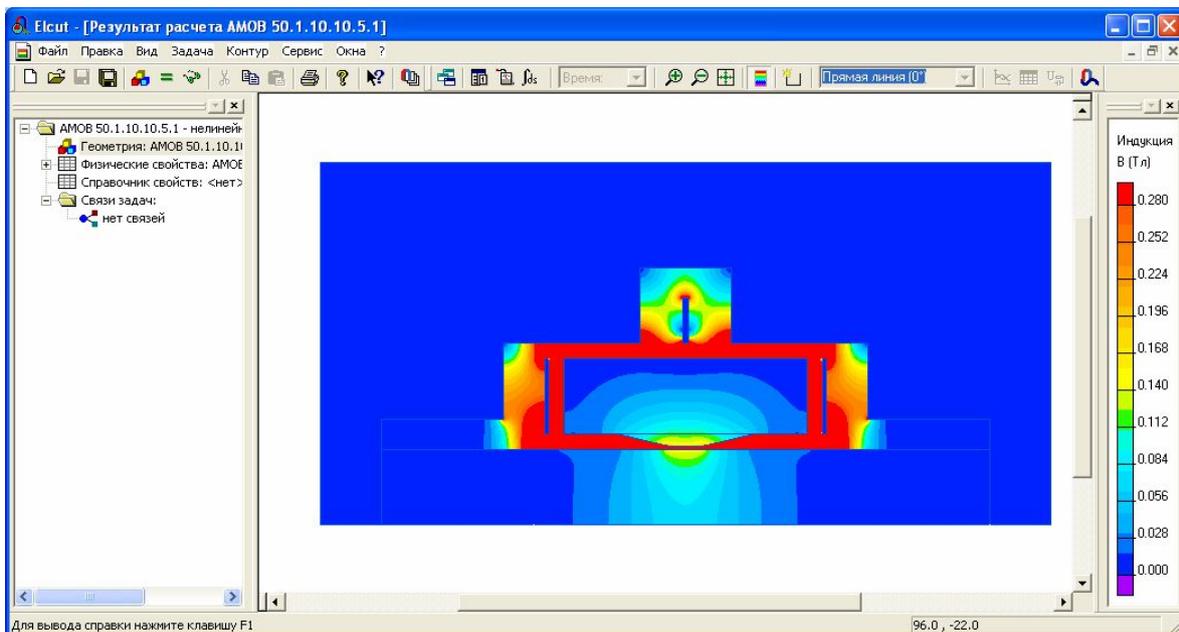


Рисунок 3.36 – Окно модели аппарата магнитной обработки воды с учетом цветовой шкалы.

В окне шкалы можно манипулировать диапазоном изображаемой величины на цветовой карте:

- Можно нажать левую кнопку мыши в нужном месте шкалы и протащить ее на нужное расстояние, удерживая кнопку, чтобы сузить диапазон.
- Дважды щелкнуть над цветным столбцом для возврата к оптимальному диапазону.

Цветовая шкала может быть скопирована в буфер обмена как картинка. Перед этим может потребоваться перейти от цветного изображения к режиму серых полутонов, если впоследствии предполагается печать на монохромном принтере. Эти команды доступны в контекстном меню окна.

3.4 ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОДНОКАТУШЕЧНОГО АППАРАТА МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

При проектировании очень часто сталкиваются с противоречивостью выбора из множества критериев. Необходимо учитывать важность критериев в каждом конкретном случае.

Основным критерием оптимального аппарата принимается обеспечение в зоне обработки, определенного значения конструкционного модуля M . Этот показатель представляет собой произведение магнитной индукции аппарата, скорости пересечения водой магнитного поля v и времени нахождения воды в зоне обработки t .

$$M = V_{\text{cp}} v t, \quad (3.1)$$

где M – конструкционный модуль, Тл·м;

V_{cp} – средняя магнитная индукция, Тл;

v – скорость потока жидкости, м/с;

t – время нахождения жидкости в магнитном поле, с.

Для тех систем, где скорость потока жидкости можно принять постоянной, уравнение приобретет вид:

$$M = V_{\text{cp}} l_0, \quad (3.2)$$

где l_0 – путь воды в зоне обработки, м.

Опираясь на данные приведенный в [105], можно сказать, что эффективной обработка будет при значениях $M = 0,002 \dots 0,02$ Тл·м

Использование выше указанного критерия проектировщиками позволяет им варьировать значениями магнитной индукции и шириной зоны обработки, для определения оптимальной конструкции аппарата, при сохранении заданного значения конструкционного модуля.

Получить магнитное поле в зоне обработки предполагается за счет изменения площади поперечного сечения магнитопровода, прохождению магнитного потока, что приведет к насыщению ферромагнитного материала в местах с наименьшим сечением. В результате насыщения этого участка, основной магнитный поток будет выталкиваться в окружающее пространство. Предполагаем, что возможно получить различные характеристики магнитного поля, изменяя конструкцию магнитной системы.

Для проведения исследований и систематизации полученного материала выполним шифровку различных конструкций аппарата по методике указанной на рисунке 3.37.



Рисунок 3.37 – Структура условного обозначения аппаратов магнитной обработки воды

При составлении плана эксперимента нужно выбрать независимые факторы и расположить их априорно по значимости (ранжирование) [82, 87, 89, 92, 113, 114, 115, 127, 139]. Для сокращения объема исследований малозначимые факторы исключаются.

Исходя из формулы:

$$\Phi = \frac{Iw}{R_m}, \quad (3.3)$$

можно сказать, что на величину конструкционного модуля (М) оказывают влияние следующие факторы: магнитодвижущая сила, длина тонкой шунтирующей стенки каркаса намагничивающей катушки, угол скоса полюсов каркаса намагничивающей катушки.

Если принять, что значение МДС остается неизменным, то особый интерес для исследования представляют собой два фактора.

Первый – α - угол скоса полюса (X1).

Второй – β - длина тонкой стенки (X2).

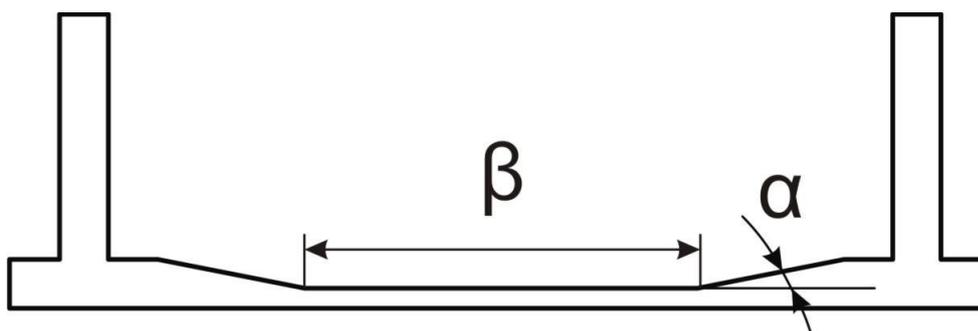


Рисунок 3.38 – Форма полюсов магнитной системы: α – угол скоса полюсов; β – длина тонкой шунтирующей стенки

Комбинации условий двухфакторного эксперимента представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Комбинации условий двухфакторного эксперимента

№ п/п	X1	X2
1	+	+
2	+	-
3	-	+
4	-	-

Далее необходимо провести описание поверхности отклика, то есть определение коэффициентов уравнения регрессии методом крутого восхождения [82]. Суть метода состоит в следующем. Фиксируем фактор X2 и начинаем движение от угла 10^0 до 90^0 с шагом 10^0 . Фиксируем фактор X1, изменяя длину тонкой стенки от 0 до 80 мм с шагом 10 мм.

В результате получается матрица исследований, представленная в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Матрица проведения исследований

$\alpha \backslash \beta$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0									
10									
20									
30									
40									
50									
60									
70									
80									

Исходя из полученной матрицы, следует, что необходимо произвести расчет восьмидесяти одной конструкции магнитной системы.

Результатом расчета магнитной системы АМОВ является картина магнитного поля [70].

Гипотеза о том, что силовые линии магнитного поля будут выталкиваться (выпучиваться) в местах, где магнитная система имеет меньшее сечение, подтвердилась расчетами. Таким образом, можно говорить о принципиально новом аппарате для магнитной обработки воды. В результате оптимизации магнитной системы получены зависимости изменения магнитной индукции в зоне обработки и конструкция аппарата магнитной обработки воды с нанесением силовых линий магнитного поля.

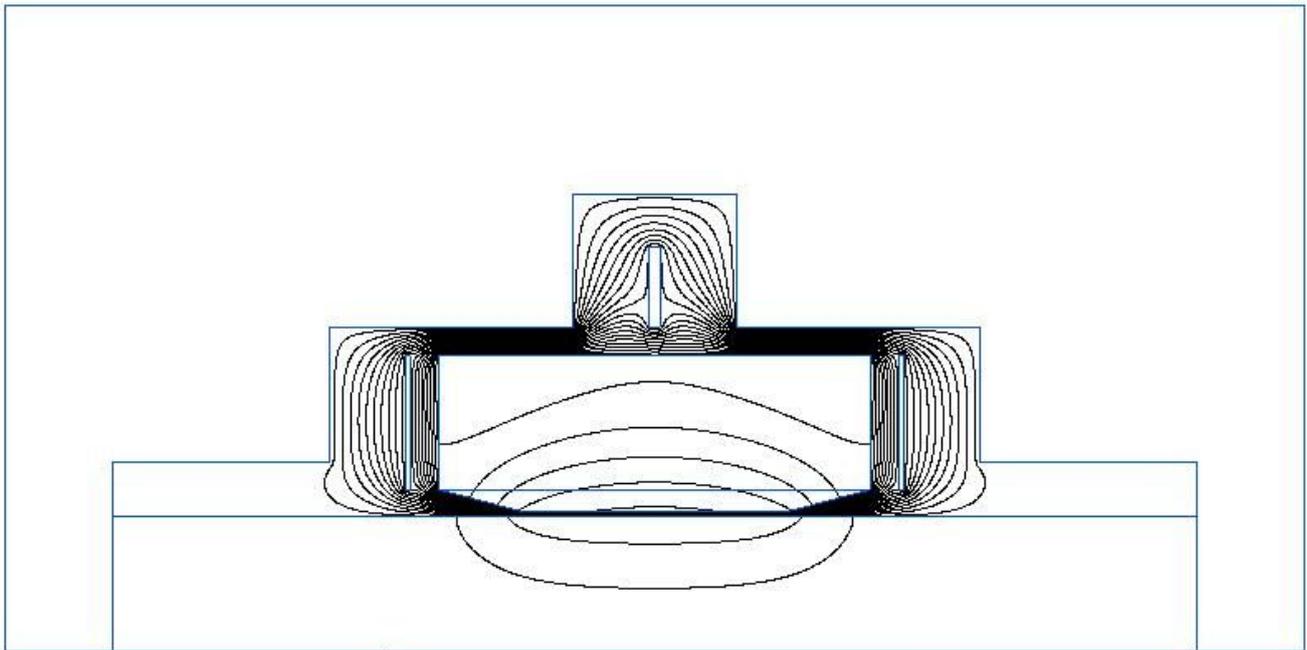


Рисунок 3.39– Результат расчета магнитной системы однокатушечного АМОВ-50.1.10.50.5.1

Для анализа параметров магнитной системы необходимо построить графические зависимости изменения магнитной индукции рабочей зоны в функции линейных размеров:

- зависимость изменения магнитной индукции (B , Тл) вдоль стенки;
- зависимость изменения магнитной индукции (B , Тл) на расстоянии 12,5 мм;
- зависимость изменения магнитной индукции (B , Тл) на оси симметрии;
- зависимость изменения магнитной индукции (B , Тл) в радиальном направлении.

Графические зависимости представлены в приложении Д.

Также необходимо провести анализ по такому параметру как конструкционный модуль [67] рисунок 3.40-3.42.

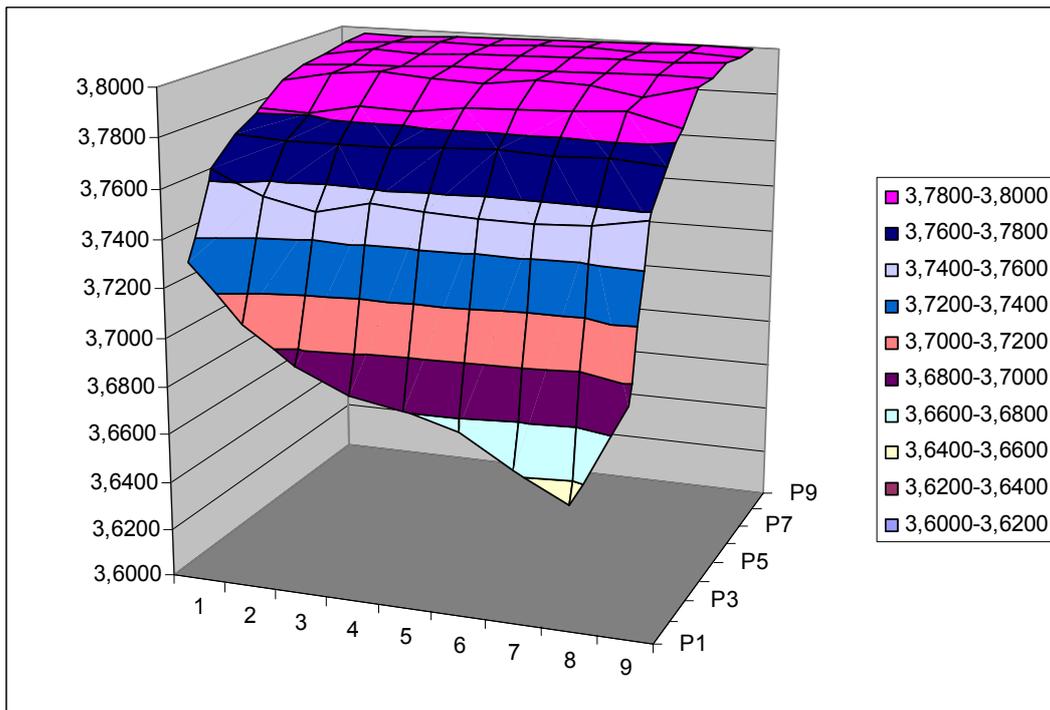


Рисунок 3.40 – Поверхность изменения величины конструкционного модуля, вдоль стенки, в функции: 1-9 – угол скоса полюсов (α); P1-P9 – длина тонкой шунтирующей стенки (β)

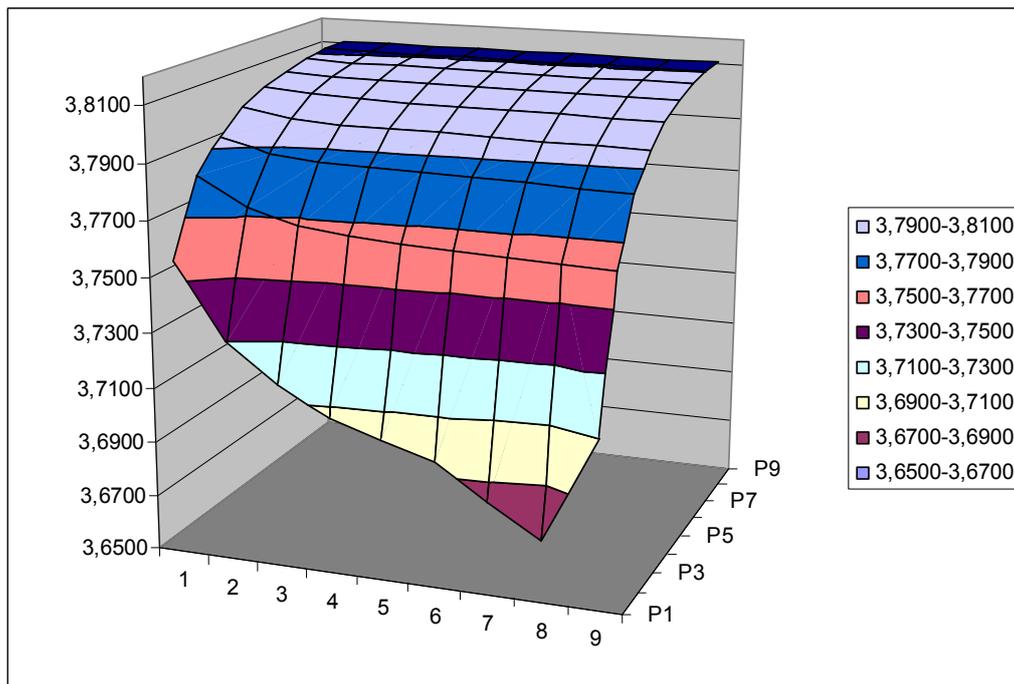


Рисунок 3.41– Поверхность изменения величины конструкционного модуля, на расстоянии 12.5 мм, в функции: 1-9 – угол скоса полюсов (α); P1-P9 – длина тонкой шунтирующей стенки (β)

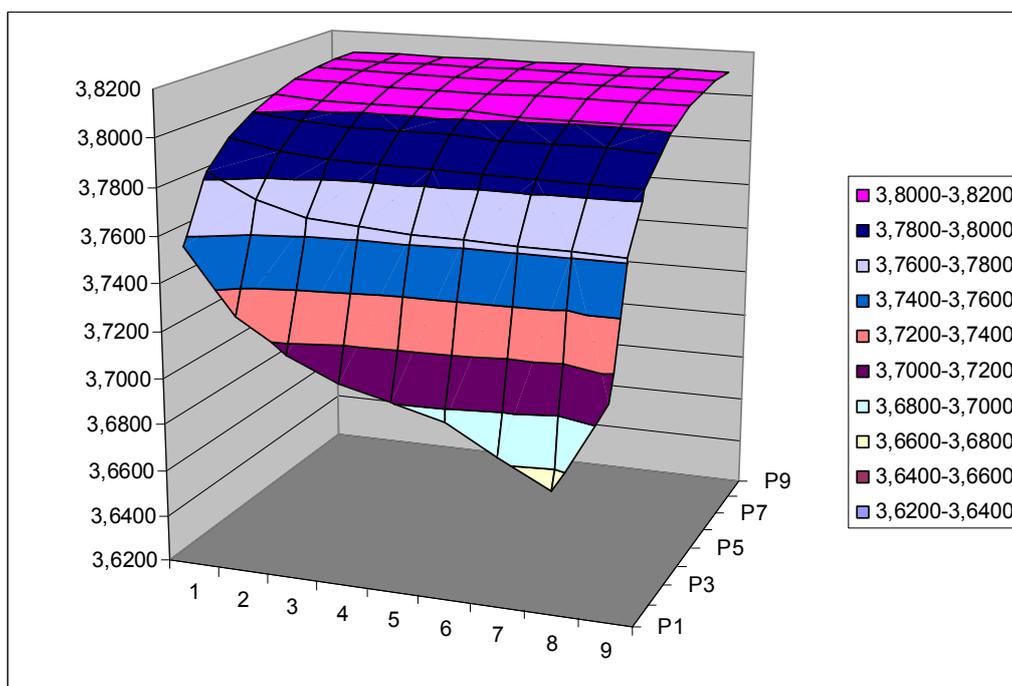


Рисунок 3.42 – Поверхность изменения величины конструкционного модуля, на оси симметрии, в функции: 1-9 – угол скоса полюсов (α); P1-P9 – длина тонкой шунтирующей стенки (β)

Анализ результатов расчета магнитной системы позволяет сделать следующие выводы:

- предложенная магнитная система позволяет получить потоки выпучивания в сторону обрабатываемой воды и намагничивающей катушки;
- изменяя параметры магнитной системы (α , β), возможно перераспределение магнитных потоков;
- наибольшее значение магнитной индукции в рабочей зоне полудукции для магнитной системы с углом скоса 90^0 и длиной тонкой стенки 0 мм;
- наибольшее значение конструкционного модуля получилось для магнитной системы с длиной тонкой стенки 80 мм вне зависимости от угла скоса полюса.

3.5 ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДВУХКАТУШЕЧНОГО АППАРАТА МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Для оптимизации магнитной системы двухкатушечного аппарата магнитной обработки воды будем использовать два фактора:

Первый – α - угол скоса полюса (X1).

Второй – β - длина тонкой стенки (X2).

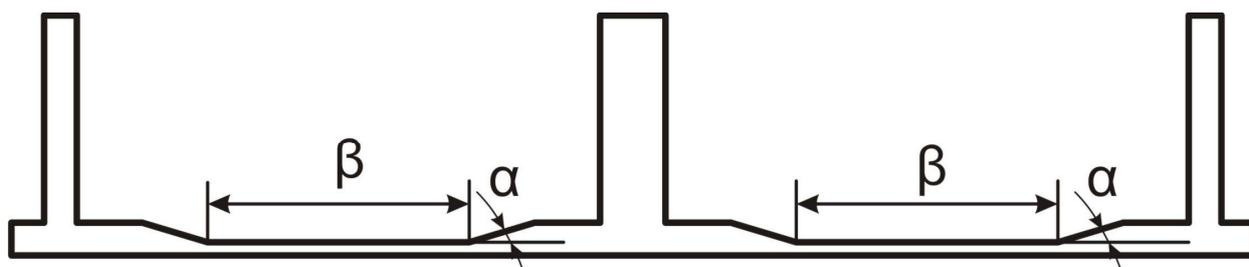


Рисунок 3.43 – Форма полюсов магнитной системы: б – угол скоса полюсов; в – длина тонкой шунтирующей стенки

Комбинации условий двухфакторного эксперимента представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Комбинации условий двухфакторного эксперимента

№ п/п	X1	X2
1	+	+
2	+	–
3	–	+
4	–	–

Далее необходимо провести описание поверхности отклика, то есть определение коэффициентов уравнения регрессии методом крутого восхождения [82]. Суть метода состоит в следующем. Фиксируем фактор X2 и начинаем движение от угла 10^0 до 90^0 с шагом 10^0 . Фиксируем фактор X1, изменяя длину тонкой стенки от 0 до 80 мм с шагом 10 мм для одной катушки. Параллельно будем изменять длину тонкой стенки 0 до 80 мм с шагом 10 мм и для второй катушки. Таким образом, общая длина тонкой вставки будет в два раза больше.

В результате получается матрица исследований, представленная в таблице 3.4

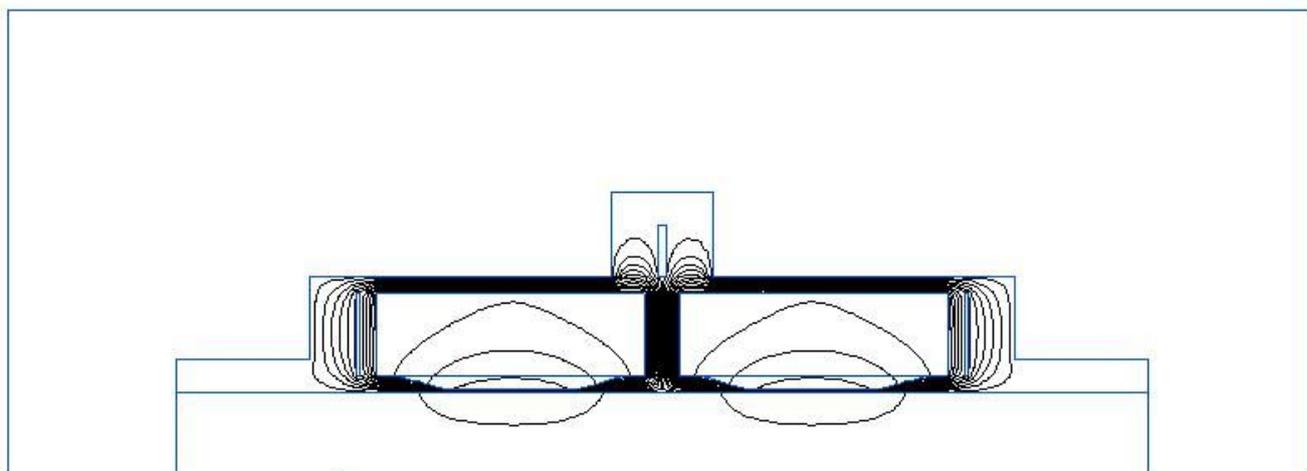
**Таблица 3.4 – Матрица проведения исследований
для двухкатушечного аппарата**

α $\beta \times 2$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0									
10									
20									
30									
40									
50									
60									
70									
80									

Исходя из полученной матрицы, следует, что необходимо произвести расчет восьмидесяти одной конструкции магнитной системы.

Расчет будем проводить используя программный комплекс ELCUT.

Результатом расчета магнитной системы АМОВ является картина магнитного поля.



**Рисунок 3.44 – Результат расчета магнитной системы двухкатушечного
АМОВ-50.2.10.40.5.1**

Графические зависимости представлены в приложении Е.

Результат расчета конструкционного модуля аппарата магнитной обработки воды, представлен на рисунках 3.45-3.47.

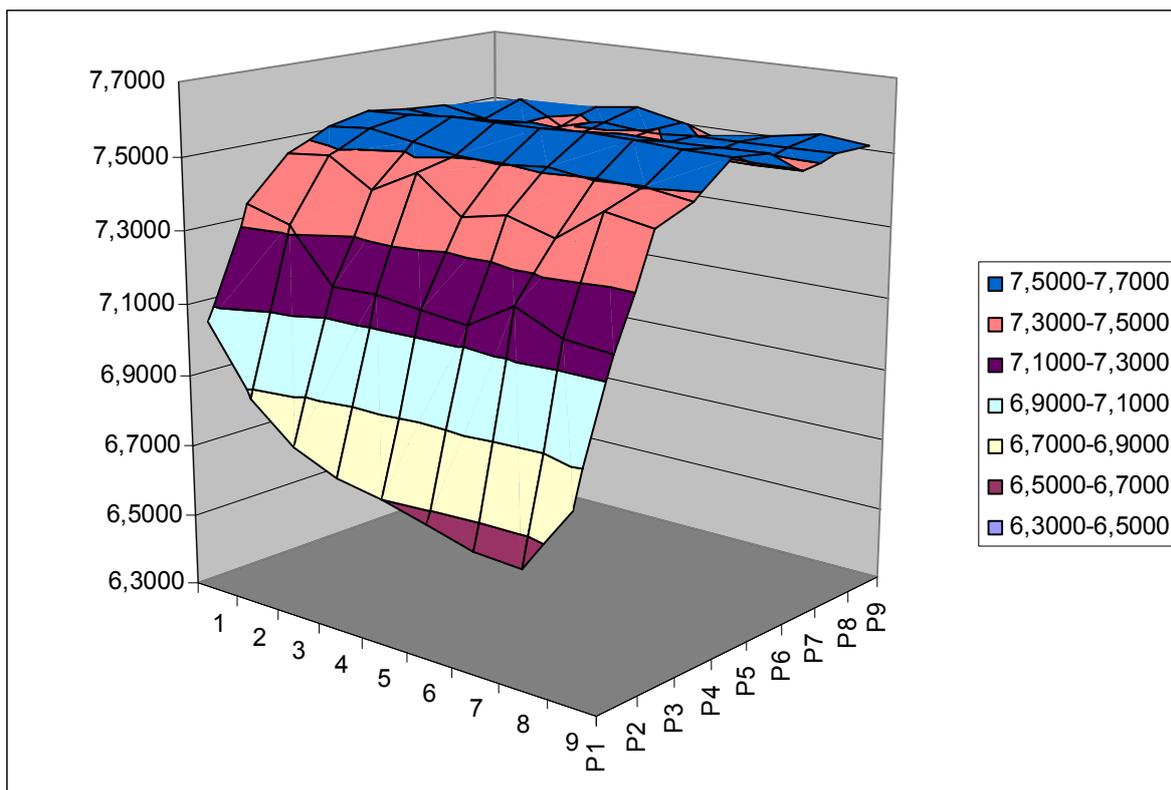


Рисунок 3.45– Поверхность изменения величины конструкционного модуля, вдоль стенки, в функции: 1-9 – угол скоса полюсов (α); P1-P9 – длина тонкой шунтирующей стенки (β)

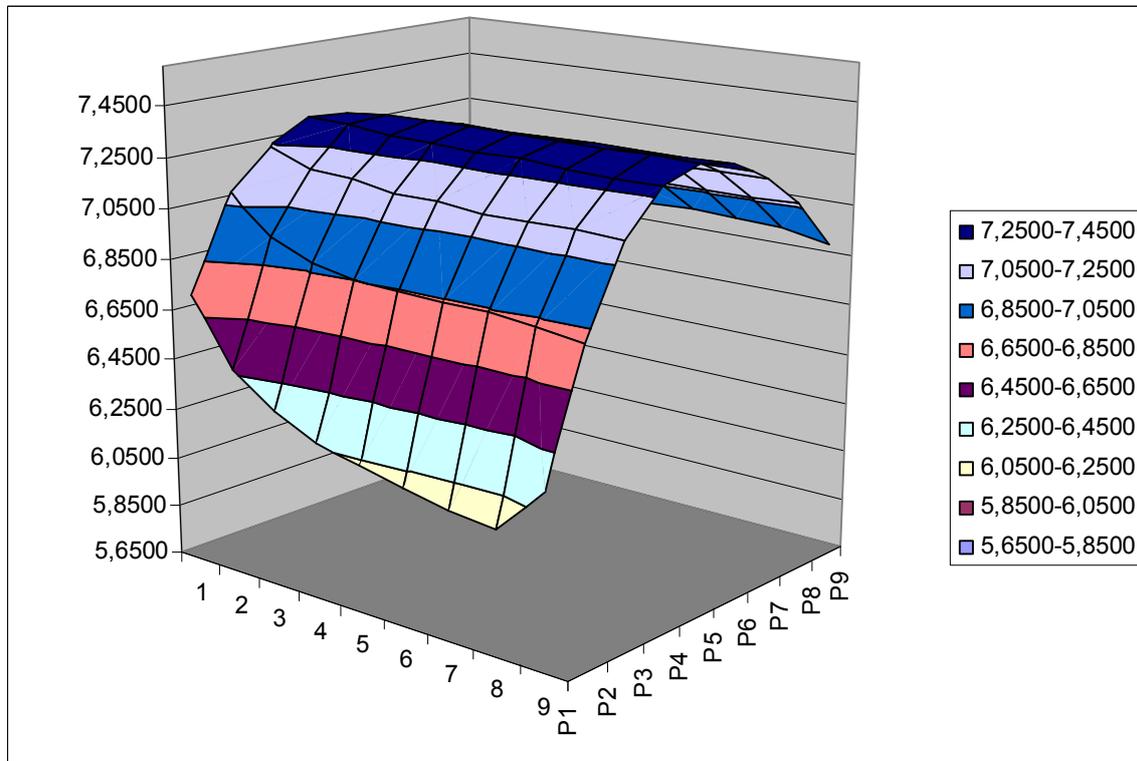


Рисунок 3.46– Поверхность изменения величины конструкционного модуля, на расстоянии 12.5 мм, в функции: 1-9 – угол скоса полюсов (α); P1-P9 – длина тонкой шунтирующей стенки (β)

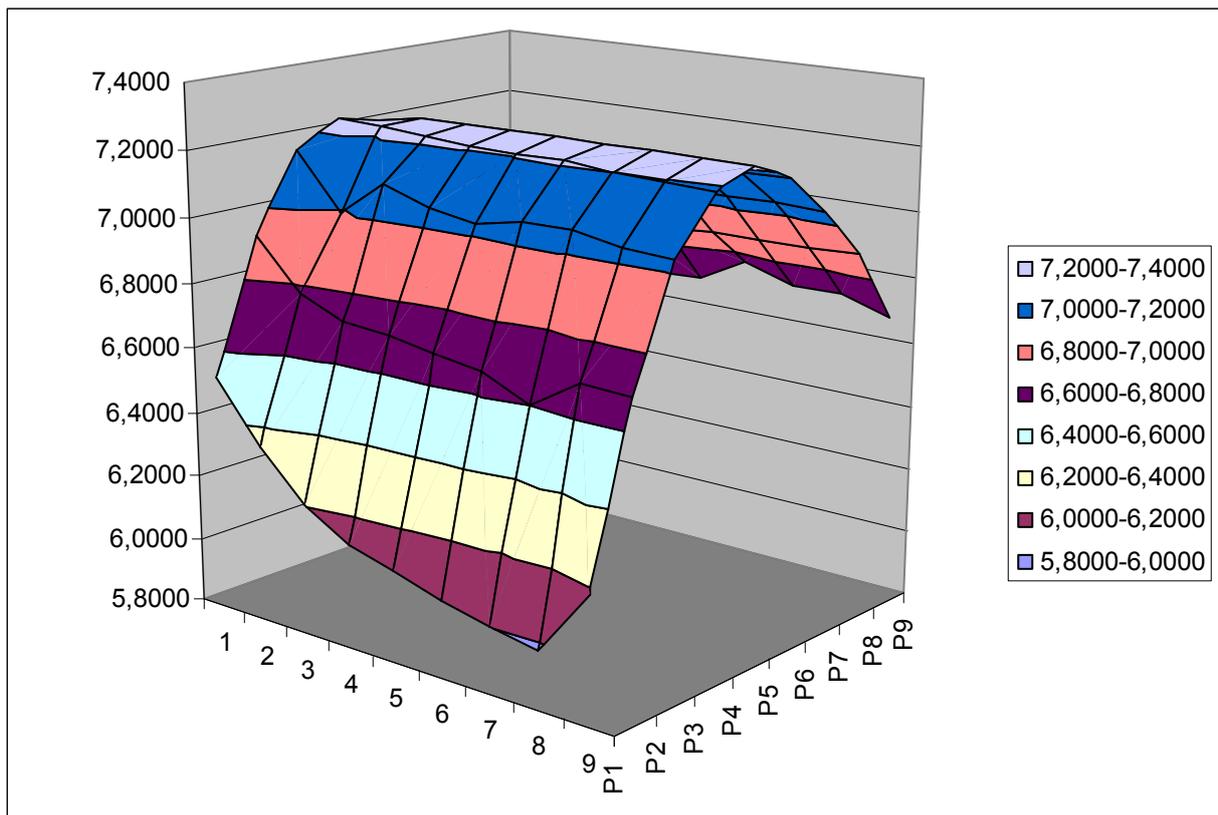


Рисунок 3.47– Поверхность изменения величины конструкционного модуля, на оси симметрии, в функции: 1-9 – угол скоса полюсов (α); P1-P9 – длина тонкой шунтирующей стенки (β)

Результат расчета аппаратов с различной геометрией магнитной системы показал что:

- при разделении намагничивающей катушки на две части с общим магнитопроводом в зоне обработки появляется два магнитных потока одинаковых по значению и противоположных по направлению;
- увеличивается длина зоны обработки воды;
- в два раза увеличивается значение конструкционного модуля.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АМОВ

4.1 СПОСОБЫ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

4.1.1 Методы контроля основанные на косвенных показателях

Кристаллооптический способ – основан на сравнении размера кристаллов взвеси ($CaCO_3$), выделяющихся при упаривание проб исходной и обработанной воды.

Для анализа отмеряют в химические стаканы емкостью 200-300 мл по 150 мл профильтрованной воды до и после обработки полем, и упаривают в 2 раза (метка на стекле) на электроплитке в строго идентичных условиях.

До нагревания на дне каждого стакана располагают в наклонном положении (под углом 45°) стеклянные пластинки (предметные стекла), чтобы в конце упаривания уровень жидкости был не ниже верхнего уровня пластинок. После упаривания пластинки извлекают пинцетом и дважды погружают в стаканы с дистиллированной водой. Иглой или лезвием бритвы снимают частицы, выделившиеся на пластинках, и помещают их в каплю воды на предметном стекле. Накрывают каплю покровным стеклом и рассматривают частицы в микроскоп сначала при увеличении в 50-70 раз, затем 200-300 раз. Определяют размер кристаллов обработанной и необработанной воды в делениях линейки окуляра или в микрометрах, а также отмечают форму кристаллов. Полученные данные позволяют сделать только сравнительную оценку и выявить относительное влияние магнитного поля на твердую фазу. Для более точного учета влияния магнитной обработки на размер кристаллов в поле зрения микроскопа фиксируют преобладающий (не менее 60-70 % общего числа) размер кристаллов.

Противонакипный эффект K_3 , %, вычисляют по формуле:

$$K_3 = \left(\frac{H - M}{H} \right) \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где K_3 – уменьшение размера кристаллов, отнесенное к размеру кристалла в исходной воде;

H – средний линейный размер кристаллов, выделившихся в исходной воде;

M – средний линейный размер кристаллов, выделившихся в воде обработанной магнитным полем.

При $K_3 = 40 - 50$ %, что соответствует уменьшению размера в 1,5 – 2 раза, эффект можно считать удовлетворительным.

При наличии в воде значительного количества органических примесей в коллоидном состоянии (желтая окраска воды, окисляемость 40 – 50 мг/кг и выше по $KMnO_4$), наблюдаемых обычно в оборотной системе водоснабжения с градирнями или прудами-охладителями, коллоидные вещества адсорбируются на гранях кристаллов и могут изменять их форму, вследствие чего оценка этим методом будет ошибочной. В подобных случаях пробы воды фильтруют, центрифугируют и анализ повторяют. В связи с вышесказанным метод может быть рекомендован при текущем контроле и наладочных работах.

Оптический способ: по мутности проб воды. Способ основан на сравнении мутности проб обработанной и необработанной воды. При нагревании проб в одинаковых условиях, помутнение в воде, обработанной магнитным полем, наступает раньше, чем в необработанной вследствие образования центров кристаллизации ($CaCO_3$). Метод достаточно чувствителен для воды, пересыщенной по накипеобразователю.

Для расчета оптической плотности определяют сначала значение полного светового потока Φ_o , а затем потоков, пропущенных через исходную воду $\Phi_{исх}$ и через обработанную магнитным полем Φ_m . При определении полного светового потока в правой и левой частях прибора, помещают кюветы с дистиллированной водой. Диафрагмы правого и левого плеча должны быть полностью открыты. При этом стрелка микроамперметра отклоняется. Вращением левого барабана стрелку возвращают в прежнее, нулевое, положение. Число делений красной шкалы этого барабана характеризует значение полного светового потока Φ_o .

Пробы исходной и обработанной воды помещают в кюветы правого пучка света и аналогично определяют значение световых потоков для каждой пробы отдельно, обозначая их через $\Phi_{исх}$ и Φ_m . Все операции должны быть выполнены не более, чем за 40 сек.

По значениям Φ_o , $\Phi_{исх}$ и Φ_m рассчитывают оптическую плотность (или коэффициент светопропускания) проб, %, по формуле:

$$\tau = \left(\frac{\Phi}{\Phi_o} \right) \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где Φ_o – значение полного светового потока;

Φ – значение светового потока, пропущенного через исследованные пробы ($\Phi_{исх}$, Φ_m).

Оптическую плотность τ рассчитывают для световых потоков, пропущенных через исходную $\Phi_{исх}$ и обработанную Φ_m воду. При надлежащей обработки воды магнитным полем, оптическая плотность обработанной воды превышает исходную. Эффект обработки, %, будет равен $\mathcal{E} = \tau_m - \tau_{исх}$.

По светопропусканию осадка на стекле. Способ принципиально не отличается от описанного выше. Разница лишь в том, что вместо проб воды применяют стеклянные пластинки, на которых предварительно осаждается взвесь. Количество последней оценивается по оптической плотности.

Для опыта вырезают пластинки из стекла размером 23×23 мм.

Осадки из проб исходной и обработанной воды получают следующим образом. Отобранные по 100 мм пробы исходной и обработанной воды, упаривают до объема 50 мл каждую. Предварительно в стаканы помещают по одному стеклу указанного размера так, чтобы одна сторона стекла касалась стенки и дна стакана, а другая располагалась наклонно. По окончании упаривания в равных тепловых условиях стекла осторожно извлекают из стакана пинцетом и опускают 2 раза в стакан с дистиллированной водой для удаления осевшего шлама. Затем стекла подсушивают в сушильном шкафу или над плиткой, после чего помещают в кюветодержатели ФЭК – 56М и определяют их светопропускаемость.

Стекла с осадками просматривают в четырех положениях – сверху, с боков и снизу, перемещая по часовой стрелке. Таким образом, для каждого стекла получают четыре значения, из которых берут среднее.

По данным Φ_o , $\Phi_{исх}$, Φ_m рассчитывают оптическую плотность осадков для исходной $\tau_{исх}$ и обработанной τ_m воды.

Способ контроля с применением микроскопа. Более точное представление о влиянии магнитного поля получается непосредственным подсчетом центров кристаллизации в определенном объеме воды.

Основываясь на результат предшествующих исследований, М.Л. Михельсон разработал способ, позволяющий не только контролировать, но и настраивать работу магнитного аппарата на оптимальный режим, учитывая концентрацию центров кристаллизации.

По этому способу от воды, поступающей в электромагнитный аппарат, отделяется поток, который пропускают через контрольное магнитное поле (аппарат) со скоростью, равной скорости в зазоре промышленного аппарата. Часть потока ответвляют в микроскоп и изменением напряженности магнитного поля ступенями через $1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^4$ А/м (125 – 250 Э) фиксируют параметры, при которых концентрация частиц радиусом больше 0,1 – 0,3 мкм будет максимальной. Затем в промышленном аппарате устанавливают напряженность магнитного поля, равную напряженности в контрольном аппарате, при которой наблюдали максимум центров кристаллизации, обеспечивающих наибольший противонакипный эффект. Преобразуя сигнал концентрации центров кристаллизации в электрический, устанавливают по нему напряженность магнитного поля в промышленном магнитном аппарате.

Осмотический способ. Способ основан на свойстве жидкостей с

различными концентрациями растворенных веществ, разделенных полупроницаемой перегородкой (мембраной), проникать из разбавленного раствора в концентрированный. Схема осмотической ячейки осмометра показана на рисунке 4.1 В начале опыта обе жидкости находятся на одном уровне. Через некоторое время, вследствие проникновения воды через мембрану, обе жидкости в ячейке увеличиваются и жидкость будет подниматься по трубке осмометра до некоторой высоты h , при которой гидростатическое давление столба жидкости уравнивает осмотическое давление.

При прохождении воды через магнитный аппарат, ферромагнитные окислы железа, обычно присутствующие в воде в коллоидном состоянии, коагулируют, частично задерживаются в межполюсном пространстве аппарата, а остальные, более крупные агломераты, увлекаются потоком воды. Поэтому, после магнитного аппарата концентрация окислов железа в воде и их влияние на поры мембраны снижаются, благодаря чему проницаемость воды сквозь пленку повышается, и скорость подъема ее в трубке осмометра возрастает. Разность в скорости подъема воды характеризует эффект магнитной обработки.

При проведении опыта, ячейку погружают в стакан с предварительно налитой исследуемой водой, объем которой равен 50 мл, с таким расчетом, чтобы ячейка не доходила до дна на 10 мм. По прошествии 15 мин. отмечают уровень жидкости в измерителе и определяют скорость подъема в миллиметрах в минуту. Сначала опыт проводят с необработанной, а затем с обработанной водой.

Осмотический эффект $\mathcal{E}_{осм}$, %:

$$\mathcal{E}_{осм} = \frac{v_M - v_H}{v_H} \cdot 100, \quad (4.3)$$

где v_M – скорость подъема жидкости в обработанной воде, мм/мин;
 v_H – то же в необработанной, мм/мин.

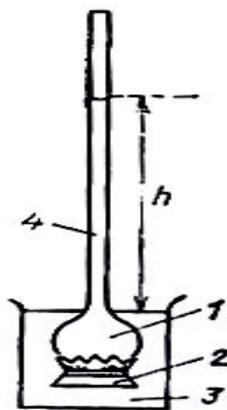


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема осмометра: 1 – осмотическая ячейка с раствором; 2 – мембрана; 3 – вода; 4 – измерительная трубка

Экспресс – способы контроля влияния магнитного поля. Качественное влияние магнитного поля на воду можно установить экспресс – методами.

По скорости появления помутнения при нагревании. Методически способ аналогичен оптическому, но без количественного определения.

По конусу Тиндаля. При прохождении света через воду, содержащую коллоидные частицы, происходит дифракция света, сопровождающаяся образованием светящегося голубоватым светом конуса, названного по имени его первооткрывателя конусом Тиндаля. Для опыта служит коробка размером 150×120×150 мм, помещенная в темной комнате. В середине крышки делают отверстие диаметром 5 мм. Внутри коробки под отверстием (не ближе 15 мм) располагают электрическую лампочку мощностью 60 Вт. В стакане, емкостью 100 мл вливают по 60 мл прозрачной обработанной и исходной воды и поочередно ставят на крышку так, чтобы отверстие было в центре дна стакана. Сбоку, на уровне жидкости, и сверху наблюдают за световым явлением. Появление светового конуса различной интенсивности служит показателем действия магнитного поля в результате образования микрочастиц в межполюсном пространстве аппарата. В отсутствие влияния магнитного поля подобный конус не появляется.

По уменьшению концентрации свободной двуокиси углерода. В пробах воды до обработки магнитным полем и после нее определяют концентрацию свободной двуокиси углерода. В зависимости от напряженности магнитного поля концентрация двуокиси углерода может снизиться на 20 – 30 %, а в некоторых случаях и больше, что и будет качественно характеризовать эффект магнитной обработки воды.

4.1.2 Методы контроля основанные на учете количества выделившейся твердой фазы

Определение на стеклянной пластинке. Способ основан на выделении на стеклянной пластинке кристаллов взвеси с последующим переводом осадка в раствор и определением содержания карбоната кальция, в основном составляющего взвесь, ацидометрическим методом или трилонометрическим методом.

200 – 100 мл необработанной воды и аналогичное количество обработанной упаривают, не доводя до кипения, в строго одинаковых тепловых условиях (с доливом или без долива) в 2 раза. В последнем варианте на стенке стакана заранее делают соответствующую метку.

До начала опыта в стакан помещают стеклянные пластинки таким же образом, как и при кристаллооптическом способе. По окончании упаривания, стекла извлекают и 2 -3 раза погружают в дистиллированную воду. После этого их помещают в конические колбы емкостью 300 мл, где осадок на стеклах растворяют 0,1 % соляной кислотой, подогревая колбы (в случае необходимости), разбавляют дистиллированной водой примерно до 100 мл и избытки кислоты оттитровывают 0,1 % едким натром с индикатором метиловым оранжевым или в присутствии лакмусовой бумажки. По разности между прилитой соляной кислотой и расходом раствора едкого натра определяют количество 1,0 % соляной кислоты, затраченной на растворение.

Противонакипный эффект (*ПЭ*), характеризующий снижение накипи в процентах под влиянием магнитного поля, рассчитывают по формуле:

$$ПЭ = \left(\frac{H - M}{H} \right) \cdot 100\% , \quad (4.4)$$

где *H* – расход кислоты, затраченной на растворение накипи из исходной воды,

M – то же из воды, обработанной магнитным полем.

При испытании минерализованной воды, содержащий сульфат кальция, растворение проводят 0,5 % соляной кислотой при температуре 40 °С. Серную кислоту, образующуюся при растворении и избыточную соляную кислоту нейтрализуют 0,5 % едким натром, пользуясь в качестве индикатора лакмусовой бумажкой. В растворе определяют жесткость трилонометрическим способом. Для этого жидкость разбавляют до 100 мл дистиллированной водой, приливают щелочную буферную смесь (5 мл), индикатор эриохром черный Т (3 капли) и титруют 0,1 % раствором трилона Б, отмечая расход для проб с необработанной водой *H* и обработанной *M*. Расчет проводят по формуле (4.2).

Описанный способ является ориентировочным, но в сочетании с

кристаллооптическим может дать некоторые представления о влиянии магнитного поля на воду. Кристаллы, выделившиеся на дне стакана (шлам), также могут служить для оценки эффекта. Для этого шлам отфильтровывают и растворяют осадок на фильтре 0,1 % соляной кислотой. Раствор переливают в мерную колбу емкостью 250 – 200 мл, доливают до метки дистиллированной водой, отмеряют 100 мл и избыток кислоты нейтрализуют 0,1 % едким натром в присутствии индикатора метилового оранжевого. Шламовый эффект (ШЭ), %, определяют по количеству кислоты, затраченной на растворение осадка необработанной (Н) и обработанной (М) воды:

$$ШЭ = \left(\frac{M - H}{H} \right) \cdot 100\% , \quad (4.5)$$

Определение с нагревательным элементом. Способ основан на выделении накипи на специальном элементе, являющимся поверхностью нагрева и испарения, имитирующим процесс в котле при атмосферном давлении.

Лабораторный прибор (рисунок 4.2) состоит из электронагревателя, стакана емкостью не менее 800 мл и электроплитки. Электроплитка служит для ускорения подогрева всего объема исследуемой воды и не является обязательной. Нагревателем может служить пробирка из тугоплавкого стекла диаметром 25 – 35 мм и длиной 170 – 180 мм или специальный патрон из нержавеющей стали с такими же размерами. Внутри пробирки помещаются стержень из керамики с обмоткой из нихрома, намотанной бифилярно. Пробирку заполняют кварцевым песком и закрывают пробкой, через которую выводят гибкие проводники от спирали.

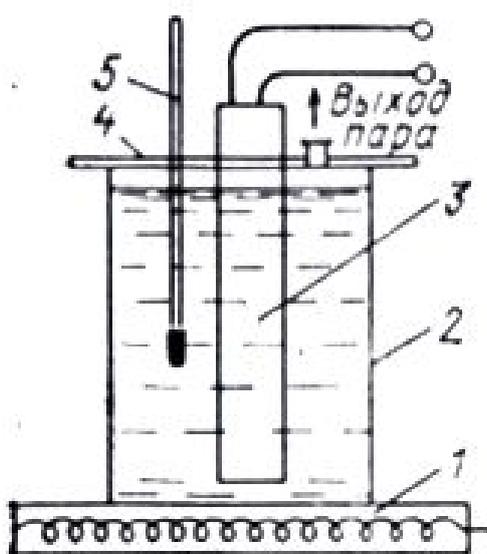


Рисунок 4.2 – Схема прибора с нагревательным элементом для определения противонакипного эффекта: 1 – электроплита; 2 – стакан; 3 – электронагреватель; 4 – крышка; 5 – термометр

Мощность спирали нагревателя подбирается такой, чтобы она обеспечила умеренное кипение 500 мл воды. Как показали исследования, материал пробирки особого значения не имеет. Значительное влияние оказывает состояние поверхности: чем больше ее шероховатость, тем быстрее выделяется накипь. По данным В.В. Вихрева [120] шероховатость поверхности может быть достигнута обработкой стекла составом, состоящим из 50 частей фтористого натрия, 5 – сульфата аммония, 10 – концентрированной серной кислоты и 50 – воды.

Нагреватель полностью погружается в стакан с крышкой. Крышку стакана подбирают из неметаллического материала, не подвергающегося деформации при 100 °С. В центре крышки вырезают отверстие для нагревателя. Термометра и выхода пара. Нагреватель укрепляют в крышке с помощью резинового кольца (шайбы) и располагают с зазором около 10 мм от дна стакана. Для эксперимента берут 0,5 л прозрачной воды, если карбонатная жесткость ее более 2 мг – экв/кг, и полностью заливают в стакан. При меньшей жесткости берут 1 л воды. Из отмеренного объема в стакан заливают сначала 0,5 л, а остальное количество доливают по мере упаривания. Стакан закрывают крышкой, отмечают уровень воды по стеклу, включают нагреватель и электроплитку и фиксируют время. Как только температура достигает 40 °С плитку выключают и пользуются только нагревателем. Воду нагревают до кипения и кипятят ее 5 – 10 мин при постоянном уровне, поддерживая его доливом дистиллированной воды.

По истечению указанного времени нагреватель включают и определяют продолжительность нагрева, который поддерживают при последующих попытках. Через 2 – 3 мин нагреватель осторожно извлекают из стакана и 2 – 3 раза погружают в предварительно подогретую до 60 – 70 °С дистиллированную воду для удаления легко отделяющихся частиц.

Количество выделившейся накипи на нагревателе определяют объемным методом. Для этого нагреватель помещают в емкость большего диаметра или другую подходящую емкость и осторожно из бюретки приливают 0,1 % соляной кислоты с расчетом, чтобы вся выделившаяся на испытуемой поверхности накипь была полностью растворена. Отмечают количество кислоты, взятой для растворения. Затем содержимое емкости переливают в коническую колбу, тщательно промывают емкость и нагреватель, собирая промывные воды в ту же колбу. Добавляют индикатор метиловый оранжевый и нейтрализуют избыток кислоты 0,1 % едким натром, отмечая расход последнего. До растворения накипи кислотой с нагревателя может быть снято несколько кристалликов для исследования под микроскопом.

Опыт проводят сначала с водой, необработанной магнитным полем, а затем в том же приборе и при тех же условиях с обработанной водой.

Перед проведением опыта стакан и электронагреватель должны быть промыты слабой соляной кислотой и несколько раз – дистиллированной водой. Сопоставимые результаты могут быть получены только в том случае, если все операции выполняются в строго одинаковых условиях. Для этого необходимо следить, чтобы выдерживались одинаковыми скорость подъема температуры, продолжительность опыта и время кипения.

Каждое определение повторяют по возможности 2 раза и берут среднее значение.

Противонакипный эффект рассчитывают по формуле (4.5), где H и M расход 0,1 % кислоты на растворение накипи в необработанной и обработанной воде.

Шлам, собирающийся на дне стакана, может быть использован для определения шламового эффекта.

Определение с использованием спирали. Способ основан на учете количества накипи, выделяющейся из необработанной и обработанной воды при нагревании. Для опыта применяется спираль из стекла или из стали, соединенная с магнитным аппаратом. Спираль полностью погружается в воду, температура которой равна 96 – 99 °С. Условия выделения накипи определяется временем пребывания воды в спирали и скоростью воды. Хорошо воспроизводимые результаты в лаборатории МЭИ получились при следующих условиях: внутренний диаметр спирали равен 5 мм, развернутая длина спирали из четырех витков – около 1000 мм, время пребывания воды в спирали – 0,5 мин, скорость воды – 0,1 м/с, температура воды, выходящей из спирали – 80 °С, объем пропускаемой воды – 3 – 5 л в зависимости от карбонатной жесткости.

Опыты должны проводиться в строго сравнимых условиях с периодическим контролем скорости воды. По окончании опыта учитывают количества образовавшихся накипи и шлама, для чего спираль промывают дистиллированной водой, которую после промывки сливают в сборник.

Для определения накипи в спираль заливают точно отмеренное количество 0,1 % соляной кислоты (0,5 % для сульфатных вод) и погружают в воду, нагретую до температуры 50 – 60 °С. Количество кислоты берут, исходя из объема спирали, определяемого предварительно. После растворения накипи раствор переливают в коническую колбу и избыток кислоты нейтрализуют 0,1 % раствором едкого натра. Применяем индикатор метиловый оранжевый, а при концентрации растворов 0,5 % - лакмусовую бумажку. Все дальнейшие операции проводятся так же, как при контроле с нагревательным элементом. По количеству накипи, выделившейся в опытах с необработанной и обработанной водой, по формуле (4.5) рассчитывают противонакипный эффект.

При работе со спиралью из стали, которая может состоять из 5 – 6

витков, условия остаются те же. В полном растворении карбонатных отложений можно убедиться по отсутствию пузырьков газа (CO_2) при повторном промывании 0,1 % кислотой.

При отсутствии спирали определение накипи можно производить в устройстве, состоящим из двух U – образных трубок, погруженных в кипящую воду. По одной из них пропускается необработанная вода, по другой – омагниченная. Объемы каждой из пропускаемых проб равны 2-3 л, скорость воды 0,1 м/с. Длина трубок, каждая из которых имеет три колена, составляет 7000 мм. Методика определения аналогична приведенной выше.

Контроль в приборе МЭИ. В МЭИ разработан и многократно использован прибор, основанный на выделении накипи на внутренней поверхности трубки, помещенной в нагреватель, по которой протекает исследуемая вода.

Прибор (рисунок 4.3) состоит из электромагнита, электронагревателя с регулируемой мощностью 800 Вт, контрольной (кварцевой) трубки и холодильника. В межполюсном пространстве (зазоре) электромагнита располагается 4 – ходовая стеклянная «петля», диаметром 3 мм, обеспечивающая четырехкратное пересечение водой магнитного поля. Время пребывания воды в поле составляет около 2 с. Обработанная вода поступает в электронагреватель, состоящий из керамической трубы с обмоткой из нихрома, намотанная бифилярно, внутри которой располагается съемная кварцевая трубка с внутренним диаметром 7 мм. Температура в нагревателе должна обеспечить кипение в нем жидкости. Вода, выходящая из контрольной трубки, охлаждается в холодильнике и собирается в приемник.

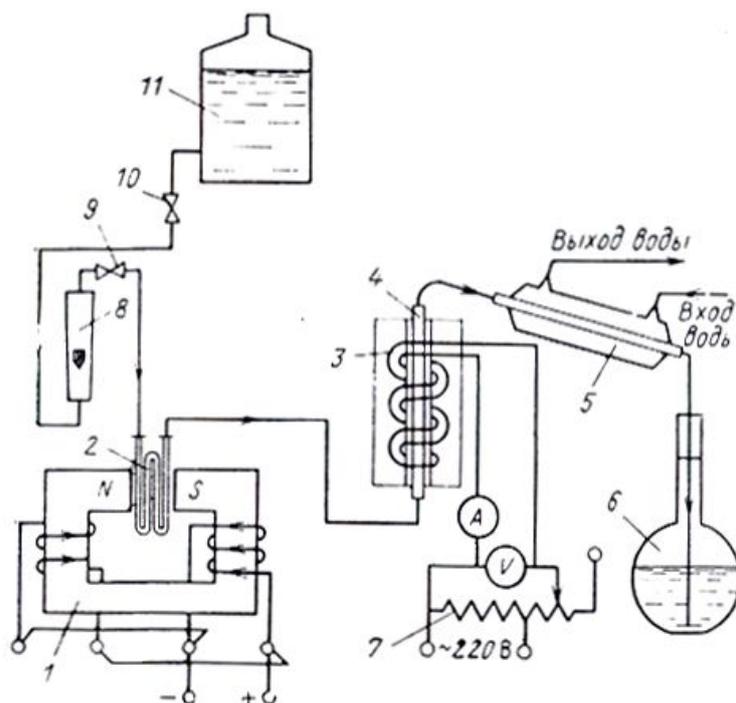


Рисунок 4.3 – Схема прибора МЭИ для определения противонакипного эффекта:
 1 – электромагнит; 2 – 4-ходовая стеклянная «петля»; 3 – электронагреватель;
 4 – контрольная (кварцевая) трубка; 5 – холодильник; 6 – емкость для сбора обработанной воды; 7 – регулятор напряжения; 8 – ротаметр (расходомер);
 9 – регулировочный вентиль; 10 – запорный вентиль; 11 – исследуемая вода

Равномерность и скорость протекания воды в приборе регулируется вентилем, расположенным на ротаметре типа РС – 3. Для опыта берут в зависимости от жесткости 1 – 2 л воды. В контрольном опыте стеклянную «петлю» извлекают из зазора электромагнита и защищают металлическим (железным) экраном, все же остальные условия сохраняются без изменения. Во избежание влияния остаточного магнитного поля рекомендуется контрольный опыт проводить в первую очередь. Накипь, выделившаяся в контрольной трубке, растворяется 0,1 % соляной кислотой, избыток которой нейтрализуют 0,1 % раствором едкого натра с индикатором метиловым оранжевым. По количеству кислоты, затраченной на растворение накипи необработанной и обработанной проб воды, по формуле (4.5) рассчитывают противонакипный эффект.

4.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АППАРАТА МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ НА ПРОЦЕСС НАКИШЕОБРАЗОВАНИЯ

Для проведения исследований разработан лабораторный стенд. Стенд (рисунок 4.4, 4.5) [73] представляет собой имитацию как разомкнутой, так и замкнутой системы теплоснабжения.

Аппарат магнитной обработки воды закрепляется на трубопровод наружными частями корпуса, к которым привариваются фланцы. Каркас намагничивающей катушки в осевом сечении имеет тонкие стенки, которые чередуются с утолщениями. Для того, чтобы увеличить или уменьшить величину магнитной индукции в зоне обработки, необходимо изменить длину тонкой стенки.

Установленный нагревательный элемент служит для перевода растворенных в воде солей во взвешенное состояние (взвесь). В экспериментальной установке предусмотрен шламоуловитель, на дне которого расположено предметное стекло, для определения кристаллооптическим способом эффективности обработки воды магнитным полем. Скорость движения воды регулируется с помощью вентиля или изменением частоты вращения циркуляционного насоса. Для того чтоб предотвратить в замкнутой системе образование воздушных пробок и разрыва трубопровода, был установлен расширительный мембранный бак и спускной вентиль (кран «Маевского»).

Экспериментальный стенд работает следующим образом:

1. Изображенный экспериментальный стенд (рисунок 4.4, 4.5) представляет имитацию как разомкнутой, так и замкнутой системы теплоснабжения и работает следующим образом: вода, поступающая из трубопровода центрального водоснабжения или нагнетаемая циркуляционным насосом (4) из емкости, проходит через аппарат магнитной обработки воды (5). После чего поступает в нагревательный бак (1). Скорость движения воды изменяется вентилем (12) или изменением частоты вращения циркуляционного насоса. Проходя нагревательный элемент, вода нагревается до температуры равной 80 – 90 °С. Вода нагретая до нужной температуры, поступает в шламоуловитель (7), и затем через отопительный прибор (2) и исследуемый элемент (8) (обрезок трубы, на внутренней стенке которой образована накипь), далее по трубопроводу в центральную канализацию или емкость. Накипь которая была удалена с внутренней стенки трубы, оседает в нижней части шламоуловителя.

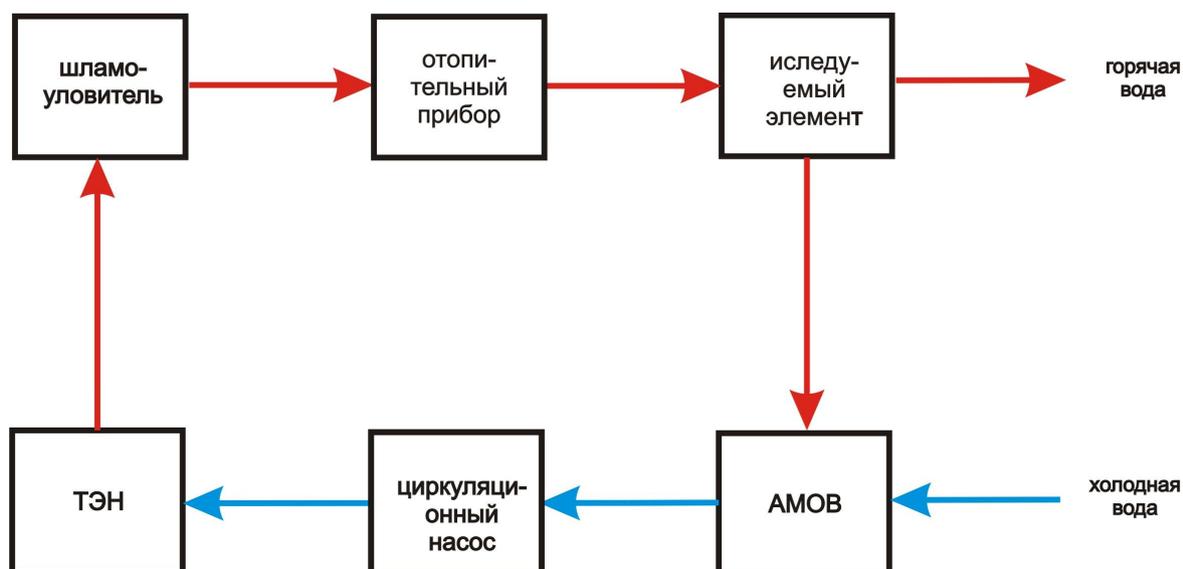


Рисунок 4.4 – Общий вид работы стенда для определения эффективности аппаратов магнитной обработки воды

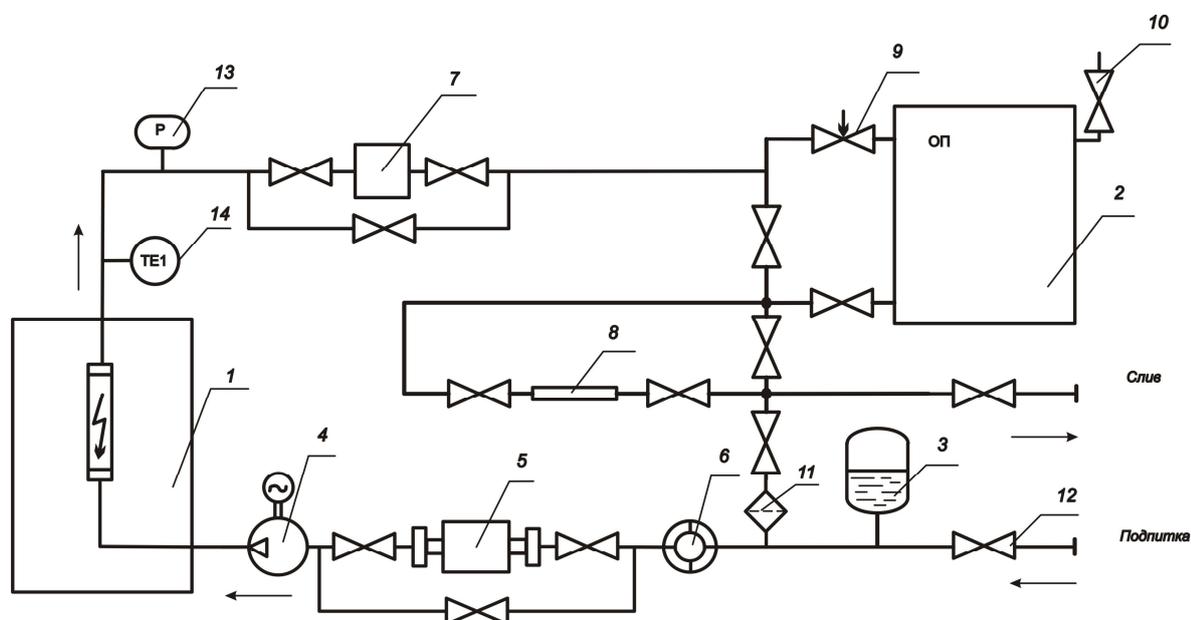


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема экспериментальной установки для определения эффективности аппаратов магнитной обработки воды: 1 – нагревательный элемент (ТЭН); 2 – отопительный прибор; 3 – расширительный бак; 4 – циркуляционный насос; 5 – аппарат магнитной обработки; 6 – счетчик расхода; 7 – шламоуловитель; 8 – исследуемый элемент; 9 – регулятор расхода; 10 – кран «Маевского»; 11 – фильтр; 12 – кран шаровый; 13 – манометр; 14 – датчик температуры

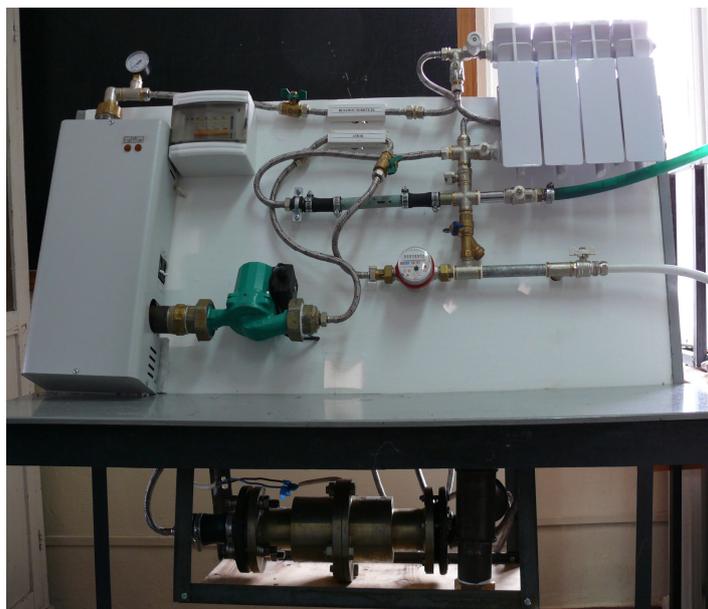


Рисунок 4.6 – Общий вид экспериментальной установки для определения эффективности аппаратов магнитной обработки воды

Накопленные научные знания не дают однозначного ответа на вопрос о влиянии магнитного поля на физико-химические процессы, происходящие в водных растворах. Однако, можно считать установленным, что магнитное поле оказывает определенное влияние на кинетику кристаллизации, вызывая увеличение концентрации центров кристаллизации в массе воды, вследствие чего вместо накипи образуется взвесь (шлам).

Таким образом, выделившаяся взвесь (шлам), прошедшая трубопровод оседает в шламоуловителе на стекле. После проведения эксперимента предметное стекло изучается под микроскопом, в результате чего определяется количество выделившейся твердой фазы.

Процессы, протекающие в воде при наложении магнитного поля, можно представить следующим образом. При прохождении воды через зону обработки магнитным полем, и наличии ферромагнетиков в пересыщенном по накипеобразователю растворе (воде), образуются зародыши центров кристаллизации.

Центром кристаллизации может быть частица той же природы, что и накипеобразователь, любая другая изоморфная с последним частица.

Кристаллизация происходит значительно быстрее и легче, если в растворе уже существует твердая поверхность. Выделение твердой фазы на готовой поверхности протекает значительно легче, так как энергия, необходимая для этого, меньше, чем для возникновения зародыша в объеме раствора.

Электрическая схема управления и контроля установкой позволяет:

- изменять подводимое напряжение;
- питать постоянным и переменным током;
- производить измерения напряжения, тока, температуры;

- изменять частоту вращения циркуляционного насоса.

Изменяемое напряжение позволяет варьировать значением магнитной индукции в зоне воздействия и тем самым, изменять дозу магнитной обработки.

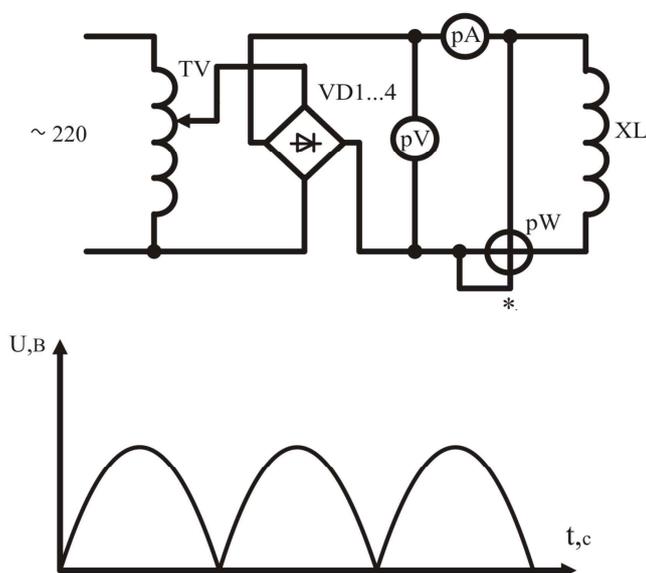


Рисунок 4.7 – Питание стенда от двухполупериодного выпрямителя

Форма питающего сигнала оказывает большое влияние на процесс магнитной обработки. Используется как переменный ток, частотой 50 Гц, так и выпрямленный с помощью диодного моста. Но, как показали экспериментальные исследования по определению эффективности магнитной обработки, однополупериодная схема выпрямления является оптимальной. Контроль за параметрами питания электроустановки осуществляется с помощью вольтметра, амперметра, ваттметра. Контроль за температурой теплоносителя в различных точках установки осуществляется с помощью термопары.

Изменение напряжения питания водонагревателя позволит плавно регулировать температуру теплоносителя установки.

Защиту схемы от коротких замыканий и длительных перегрузок выполняет автоматические выключатели серии ВА. $I_n=16$ А. Защиту водонагревателя от перегрузок осуществляет тепловое реле ТРН, от снижения питающего напряжения, магнитный пускатель серии ПМЛ.

В качестве соединительных проводов используется провод марки ПВС сечением $1,5 \text{ мм}^2$.

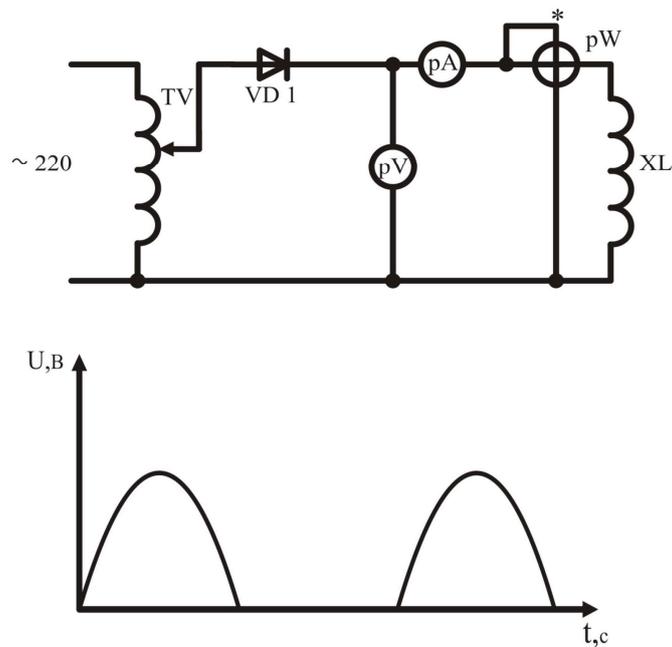


Рисунок 4.8 – Питание стенда от однополупериодного выпрямителя

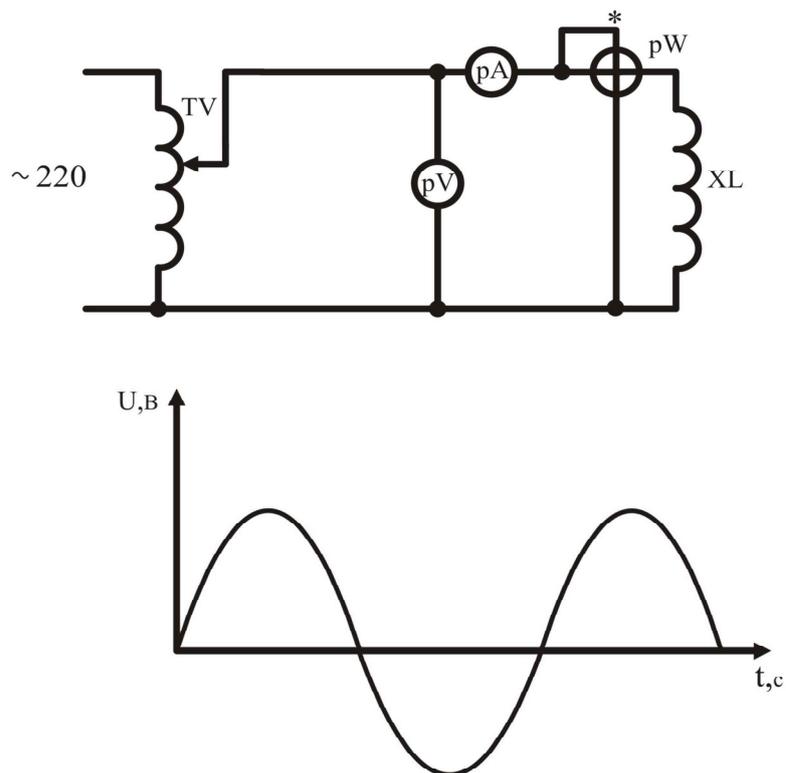


Рисунок 4.9 – Питание стенда от сети переменного тока

Для проведения экспериментальных исследований кристаллооптическим способом, используем следующую методику.

В ходе проведения эксперимента варьируем одним фактором, которым является прохождение воды через зону обработки ($n=1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 50, 90$) [69, 74, 95, 96, 97, 98, 99]. Начальная температура обработанной воды $t_{\text{нач}}^{\circ} = 16^{\circ}\text{C}$. Температура в емкости с обработанной

водой при закипании $t_{\text{кип}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$

При проведении экспериментальных исследований используем следующую методику. Вода из родника «Серафима Саровского» г.Ставрополь, пропускается через аппарат магнитной обработки 1, 3, 6, ... n раз. Обработанная вода переливается в емкость 200 мл, в которой предварительно размещено, предметное стекло. Далее происходит нагрев проб воды до температуры $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Предметные стекла извлекают из емкости, просушивают и исследуют при помощи микроскопа (Motic BA 300).

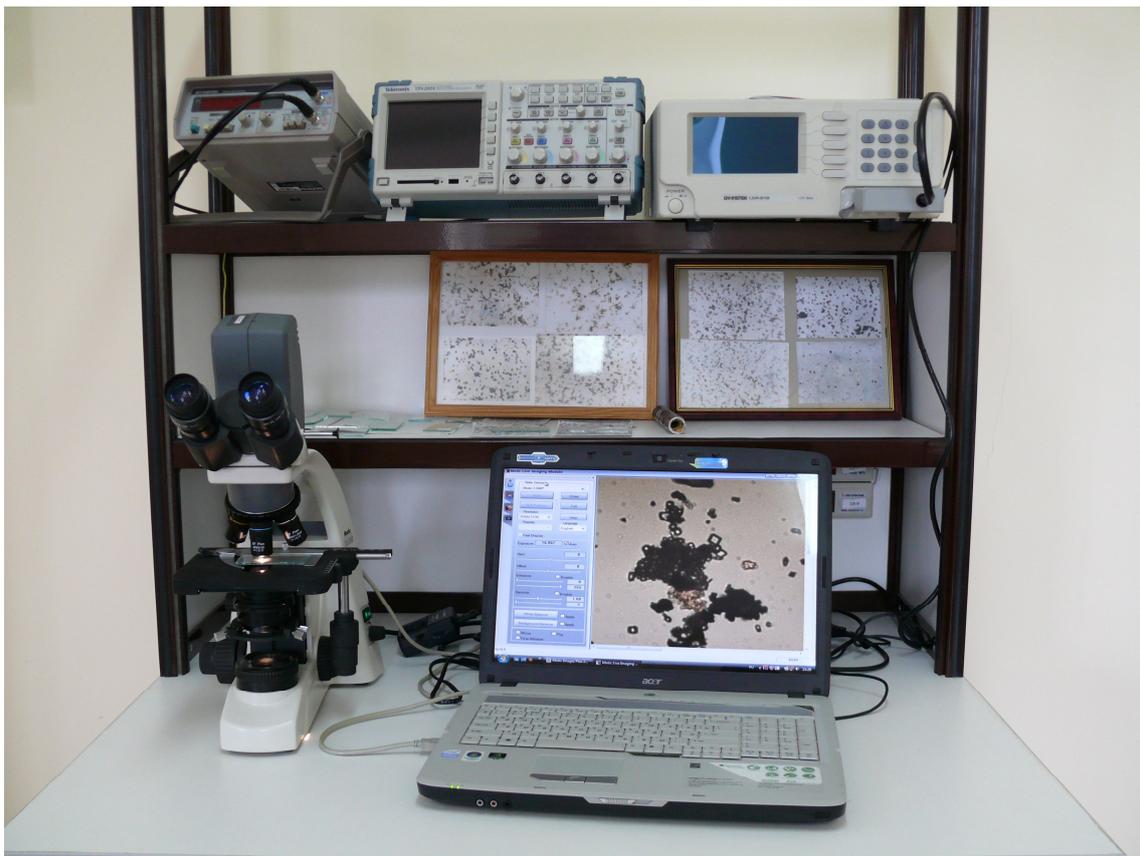


Рисунок 4.10 – Рабочее место для проведения кристаллооптического анализа экспериментальных исследований

Результаты исследований представлены в приложениях Ж и З.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2

применяются в электрических машинах, аппаратах и приборах [107]



**Рисунок А1 – Конструкция провода: 1 – жила из медной проволоки;
2 – высокопрочная эмаль с утолщенным слоем для ПЭВ-2**

Сортамент

Номиналь- ный диаметр проволоки, мм	Максимальный на- ружный диаметр, мм		Расчетное сечение, мм ²	Сопротивление постоянному току при 20 °С Ом/км	Масса 1 км провода, кг	
	ПЭВ-1	ПЭВ-2			ПЭВ-1	ПЭВ-2
0,06	0,085	0,09	0,002827	6198	0,028	0,029
0,07	0,095	0,10	0,003848	4556	0,038	0,038
0,08	0,105	0,11	0,005027	3487	0,049	0,050
0,09	0,115	0,12	0,006362	2758	0,062	0,063
0,10	0,125	0,13	0,007854	2237	0,075	0,076
0,11	0,135	0,14	0,009498	1846	0,091	0,092
0,12	0,145	0,15	0,01131	1551	0,107	0,108
0,13	0,155	0,16	0,01327	1322	0,124	0,126
0,14	0,165	0,17	0,01539	1139	0,144	0,145
0,15	0,180	0,19	0,01767	993	0,166	0,167
0,16	0,19	0,20	0,02011	872	0,188	0,189
0,17	0,20	0,21	0,02270	773	0,212	0,213
0,18	0,21	0,22	0,02545	689	0,236	0,237
0,19	0,22	0,23	0,02835	618	0,263	0,264
0,20	0,23	0,24	0,03142	558	0,290	0,292
0,21	0,24	0,25	0,03464	506	0,320	0,321
0,23	0,27	0,28	0,04155	422	0,383	0,386
0,25	0,29	0,30	0,04909	357	0,452	0,454
0,27	0,31	0,32	0,05726	306	0,526	0,529
0,29	0,33	0,34	0,06605	265	0,605	0,608
0,31	0,35	0,36	0,07548	232	0,680	0,693
0,33	0,37	0,38	0,08553	205	0,780	0,784
0,35	0,39	0,41	0,09621	182	0,876	0,884
0,38	0,42	0,44	0,1134	155	1,03	1,04
0,41	0,45	0,47	0,1320	133	1,20	1,21

0,44	0,48	0,50	0,1521	115	1,38	1,39
0,47	0,51	0,53	0,1735	101	1,57	1,58
0,49	0,53	0,55	0,1886	93,0	1,71	1,72
0,51	0,56	0,58	0,2043	85,9	1,86	1,87
0,53	0,58	0,60	0,2206	79,5	2,01	2,03
0,55	0,60	0,62	0,2376	73,7	2,16	2,17
0,57	0,62	0,64	0,2552	68,7	2,30	2,34
0,59	0,64	0,66	0,2734	64,1	2,48	2,50
0,62	0,67	0,69	0,3019	58,0	2,74	2,76
0,64	0,69	0,72	0,3217	54,5	2,92	2,94
0,67	0,72	0,75	0,3526	49,7	3,19	3,21
0,69	0,74	0,77	0,3739	46,9	3,38	3,41
0,72	0,77	0,80	0,4072	43,0	3,67	3,73
0,74	0,80	0,83	0,4301	40,7	3,90	3,92
0,77	0,83	0,86	0,4657	37,6	4,22	4,24
0,80	0,86	0,89	0,5027	34,8	4,55	4,58
0,83	0,89	0,92	0,5411	32,4	4,89	4,92
0,86	0,92	0,95	0,5809	30,1	5,25	5,27
0,90	0,96	0,99	0,6362	27,5	5,75	5,78
0,93	0,99	1,02	0,6793	25,8	6,13	6,16
0,96	1,02	1,05	0,7238	24,2	6,53	6,56
1,00	1,08	1,11	0,7854	22,4	7,12	7,14
1,04	1,12	1,15	0,8495	20,6	7,70	7,72
1,08	1,16	1,19	0,9161	19,1	8,29	8,32
1,12	1,20	1,23	0,9852	17,8	8,92	8,94
1,16	1,24	1,27	1,057	16,6	9,56	9,59
1,20	1,28	1,31	1,131	15,5	10,3	10,4
1,25	1,33	1,36	1,227	14,3	11,1	11,2
1,30	1,38	1,41	1,327	13,2	12,0	12,1
1,35	1,43	1,46	1,431	12,3	12,9	13,0
1,40	1,48	1,51	1,539	11,3	13,9	14,0
1,45	1,53	1,56	1,651	10,6	14,9	15,0
1,50	1,58	1,61	1,767	9,93	15,9	16,0
1,56	1,64	1,67	1,911	9,17	17,2	17,3
1,62	1,70	1,73	2,061	8,50	18,5	18,6
1,68	1,76	1,79	2,217	7,91	19,9	20,0
1,74	1,82	1,85	2,378	7,37	21,3	21,4
1,81	1,90	1,93	2,573	6,81	23,2	23,3
1,88	1,97	2,00	2,777	6,31	25,1	25,2
1,95	2,04	2,07	2,988	5,87	26,9	27,0
2,02	2,11	2,14	3,205	5,47	28,8	28,9
2,10	2,20	2,23	3,164	5,06	31,2	31,3
2,26	2,36	2,39	4,012	4,37	36,1	36,2
2,44	2,54	2,57	4,676	3,75	42,0	42,1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Провод марки ПСД

Применяется в электрических машинах, аппаратах и приборах



Рисунок Б1 – Конструкция провода: 1 – жила из медной отожженной проволоки; 2,3 – обмотки из стекловолокна

Сортамент

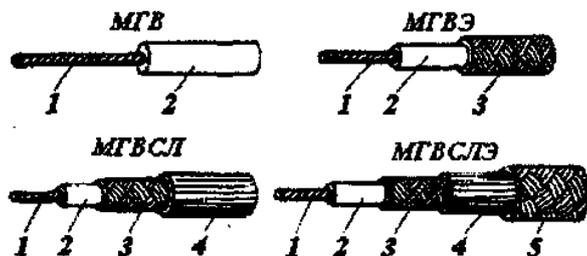
Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный наружный диаметр, мм	Расчетное сечение, мм ²	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	Масса 1 км провода, кг
0,41	0,65	0,1320	133	1,45
0,44	0,68	0,1521	115	1,71
0,47	0,71	0,1735	101	1,92
0,49	0,73	0,1886	93,0	2,07
0,51	0,75	0,2043	85,9	2,22
0,53	0,79	0,2206	79,5	2,55
0,55	0,81	0,2376	73,7	2,69
0,57	0,83	0,2552	68,7	2,89
0,59	0,85	0,2734	64,1	2,93
0,62	0,88	0,3019	58,0	3,21
0,64	0,90	0,3217	54,5	3,40
0,67	0,93	0,3526	49,7	3,85
0,69	0,95	0,3739	46,9	3,90
0,72	0,99	0,4072	43,0	4,36
0,74	1,01	0,4301	40,7	4,43
0,77	1,04	0,4657	37,6	4,94
0,80	1,07	0,5027	34,8	5,12
0,83	1,10	0,5411	32,4	5,67
0,86	1,13	0,5809	30,1	5,86
0,90	1,17	0,6362	27,5	6,36
0,93	1,20	0,6793	25,8	6,99
0,96	1,23	0,7238	24,2	7,20
1,00	1,29	0,7854	22,4	7,85
1,04	1,33	0,8495	20,6	8,44
1,08	1,37	0,9161	19,1	9,32

1,12	1,41	0,9852	17,8	9,71
1,16	1,45	1,057	16,6	10,7
1,20	1,49	1,131	15,5	11,1
1,25	1,54	1,227	14,3	12,0
1,30	1,59	1,327	13,2	12,9
1,35	1,64	1,431	12,3	13,9
1,40	1,69	1,539	11,3	14,9
1,45	1,74	1,651	10,6	16,2
1,50	1,79	1,767	9,93	17,0
1,56	1,85	1,911	9,17	18,3
1,62	1,91	2,061	8,50	20,2
1,68	1,98	2,217	7,81	21,1
1,74	2,04	2,378	7,37	22,6
1,81	2,11	2,573	6,81	24,4
1,88	2,18	2,776	6,31	26,2
1,95	2,25	2,987	5,87	28,8
2,02	2,32	3,205	5,47	30,1
2,10	2,40	3,464	5,06	32,5
2,26	2,62	4,012	4,37	37,9
2,44	2,80	4,676	3,75	44,0
2,63	2,99	5,533	3,22	50,9
2,83	3,19	6,290	2,78	58,7
3,05	3,42	7,306	2,40	67,9
3,28	3,65	8,450	2,07	78,3
3,53	3,90	9,787	1,79	90,6
3,80	4,17	11,34	1,54	105,0
4,10	4,47	13,20	1,32	121,0
4,50	4,88	15,90	1,10	146,0
4,80	5,18	18,10	0,969	167,0

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Провода марок МГВ, МГВЭ, МГВСЛ, МГВСЛЭ

Применяется для фиксированного монтажа схем слаботочной аппаратуры
и электроприборов



**Рисунок В1 – Конструкция проводов: 1 – жила из медных луженых проволок;
2 – изоляция из полихлорвинила; 3 – оплетка из стекловолокна;
4 – лаковое покрытие; 5 – оплетка из медных луженых проволок (экран)**

Сортамент

Номинальное сечение жилы, мм ²	Максимальный наружный диаметр, мм				Конструкция жилы		
					число проволок	диаметр, мм	
	МГВ	МГВЭ	МГВСЛ	МГВСЛЭ		проволоки	жилы
0,1	1,4	1,8	–	–	7	0,14	0,42
0,2	1,5	1,8	–	–	7	0,20	0,60
0,35	1,7	2,1	2,2	2,9	7	0,26	0,78
0,5	1,9	2,3	2,4	3,0	7	0,30	0,90
					7	0,37	1,11
0,75	2,1	2,5	2,6	3,2	15	0,26	1,22
1	2,5	2,9	3,1	3,7	19	0,26	1,30
2	–	–	3,7	4,3	37	0,26	1,80
3	–	–	4,3	4,9	56	0,26	2,30

Характеристика проводов

Номинальное сечение жилы, мм ²	Сопротивление постоянному току при +20 °С, Ом/км,	Масса 1 км провода, кг			
		МГВ	МГВЭ	МГВСЛ	МГВСЛЭ
0,1	210	2,8	9,3	–	–
0,2	100	3,4	10,7	–	–
0,35	58,0	6,0	15,0	8,0	15,0
0,5	41,3	7,6	16,6	10,0	17,0
0,75	26,8	10,5	19,7	13,0	21,0
1	20,5	14,5	26,1	17,5	26,0
2	10,2	–	–	3,1	38,0
3	6,30	–	–	45,0	55,0

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Провода прямоугольного сечения

**Таблица Г1 – Номинальные размеры $a \times b$ и расчетные сечения s меди
обмоточной прямоугольной**

	0,9	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10
2,10	1,82	1,89	2,06	2,23	2,42	2,63	2,84	3,07	3,32	3,59	3,92	3,92
2,26	1,96	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	4,22	4,35
2,44	2,13	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,21	4,55	4,64
2,63	2,30	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	3,80	4,21	4,55	4,92	5,04
2,83	2,48	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	4,91	5,31	5,46
3,05	–	2,84	3,05	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93
3,28	–	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,30	5,73	6,19	6,41
3,53	–	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	6,18	6,67	6,93
3,80	–	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50
4,1	–	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13
4,4	–	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76
4,7	–	4,49	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39
5,1	–	4,89	5,30	5,71	6,17	6,88	7,19	7,75	8,36	9,02	9,74	10,20
5,5	–	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	8,37	9,03	9,75	10,50	11,10
5,9	–	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	10,50	11,30	11,90
6,4	–	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	9,77	10,60	11,40	12,30	12,90
6,9	–	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	10,60	11,40	12,30	13,30	14,00
7,4	–	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,50	11,30	12,60	13,30	14,20	15,00
8,0	–	7,79	8,43	9,07	9,79	10,60	11,40	12,30	13,20	14,40	15,40	16,30
8,6	–	8,39	9,08	9,77	10,60	11,40	12,30	13,20	14,20	15,50	16,60	17,60
9,3	–	–	–	–	–	12,40	13,30	14,30	15,40	16,60	17,90	19,00
10,0	–	–	–	–	–	–	–	15,40	16,60	17,90	19,30	20,50
10,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	19,30	20,90	22,20
11,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	23,90
12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	25,80
13,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

продолжение таблицы Г1

	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70	5,10	5,50
2,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,26	4,63	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,44	5,10	5,37	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,63	5,48	5,94	6,44	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,83	5,92	6,43	6,92	7,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,05	6,41	6,96	7,54	8,15	8,72	–	–	–	–	–	–	–	–
3,28	6,93	7,52	8,15	8,80	9,52	10,30	–	–	–	–	–	–	–
3,53	7,50	8,13	8,80	9,51	10,30	11,10	12,00	–	–	–	–	–	–
3,80	8,11	8,79	9,51	10,30	11,10	12,00	12,90	13,90	–	–	–	–	–
4,1	8,79	9,52	10,30	11,10	12,00	13,00	14,00	15,10	15,90	–	–	–	–
4,4	9,46	10,20	11,10	12,00	12,90	13,90	15,00	16,20	17,10	18,50	–	–	–
4,7	10,10	11,00	11,90	12,80	13,80	14,90	16,10	17,40	18,40	19,30	20,80	–	–
5,1	11,00	11,90	12,90	13,90	15,10	16,20	17,50	18,90	20,00	21,50	22,60	25,10	–
5,5	11,90	12,90	14,60	15,10	16,30	17,50	18,90	20,40	21,70	23,30	25,00	27,20	–
5,9	12,80	13,90	15,00	16,20	17,50	18,90	20,30	21,90	23,30	25,10	26,80	29,20	–
6,4	14,00	15,10	16,30	17,60	19,00	20,50	22,10	23,80	25,30	27,30	29,20	31,70	34,30
6,9	15,10	16,30	17,70	19,00	20,60	22,10	23,90	25,70	27,40	29,50	31,50	34,30	37,10
7,4	16,20	17,60	19,00	20,40	22,10	23,60	25,60	27,60	29,40	31,70	33,90	36,8	39,8
8,0	17,60	19,00	20,50	22,10	23,90	25,70	27,70	29,90	31,90	34,30	36,70	39,90	43,10
8,6	18,90	20,50	22,10	23,80	25,70	27,70	29,90	32,20	34,40	36,90	95,4	43,00	46,40
9,3	20,50	22,30	24,00	25,80	27,90	30,00	32,30	34,80	37,20	40,00	42,80	46,50	50,50
10,0	22,10	23,90	25,80	27,80	30,00	32,30	34,80	37,50	40,10	43,10	46,10	50,10	54,10
10,8	23,90	25,90	27,90	30,10	32,40	34,90	37,60	40,50	43,40	46,60	49,90	54,20	58,50
11,6	25,70	27,80	30,00	32,30	34,90	37,50	40,50	43,60	46,70	50,10	53,60	58,30	62,90
12,5	27,80	30,00	32,40	34,90	37,60	40,50	43,60	47,00	50,40	54,10	57,90	62,90	67,90
13,5	–	32,40	35,00	37,70	40,70	43,80	47,20	50,80	54,50	58,20	62,60	68,00	73,40
14,5	–	34,90	37,60	40,50	43,70	47,10	50,60	54,60	58,60	62,90	67,30	74,10	78,90

**Таблица Г2 – Толщина Δ, мм, двухсторонней
изоляции прямоугольных проводов**

Марка провода	Δ, мм, при меньшей стороне сечения, мм		
	0,9...1,95	2,1...3,8	4,1...5,5
ПБО	0,14	0,175	0,23
ПБД	0,27	0,33	0,44
ПБСО	0,88	0,88	0,66
ПСД	0,27	0,33	0,4
ПСДК	0,4	0,4	0,4

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты расчета однокатушечного АМОВ

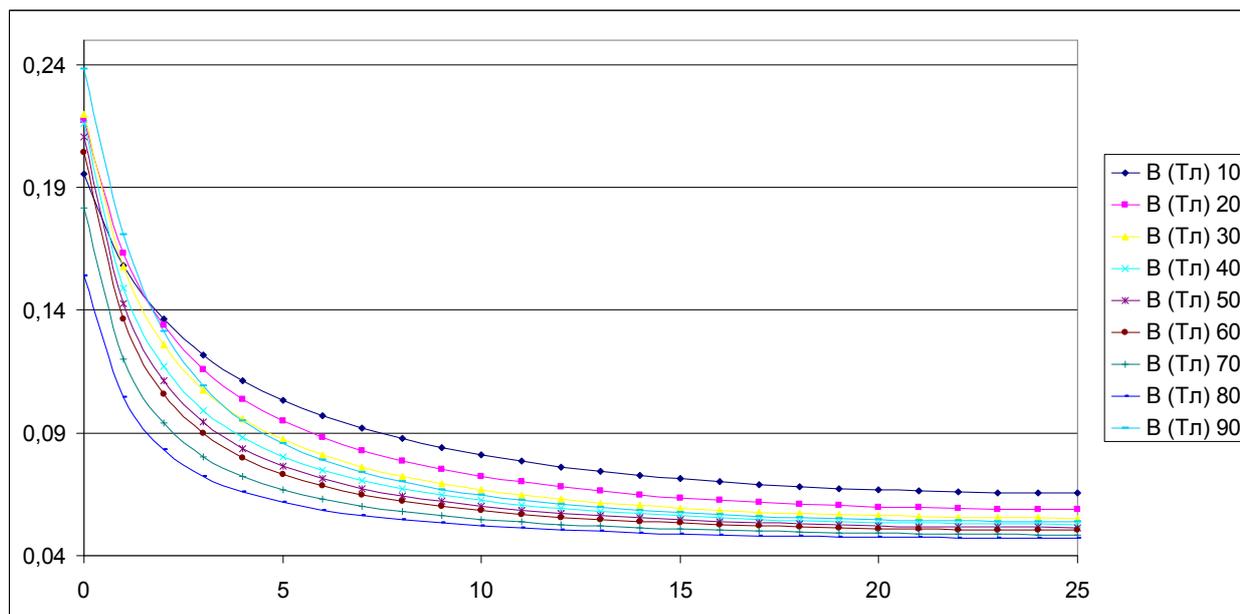


Рисунок Д1 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.0.5.1

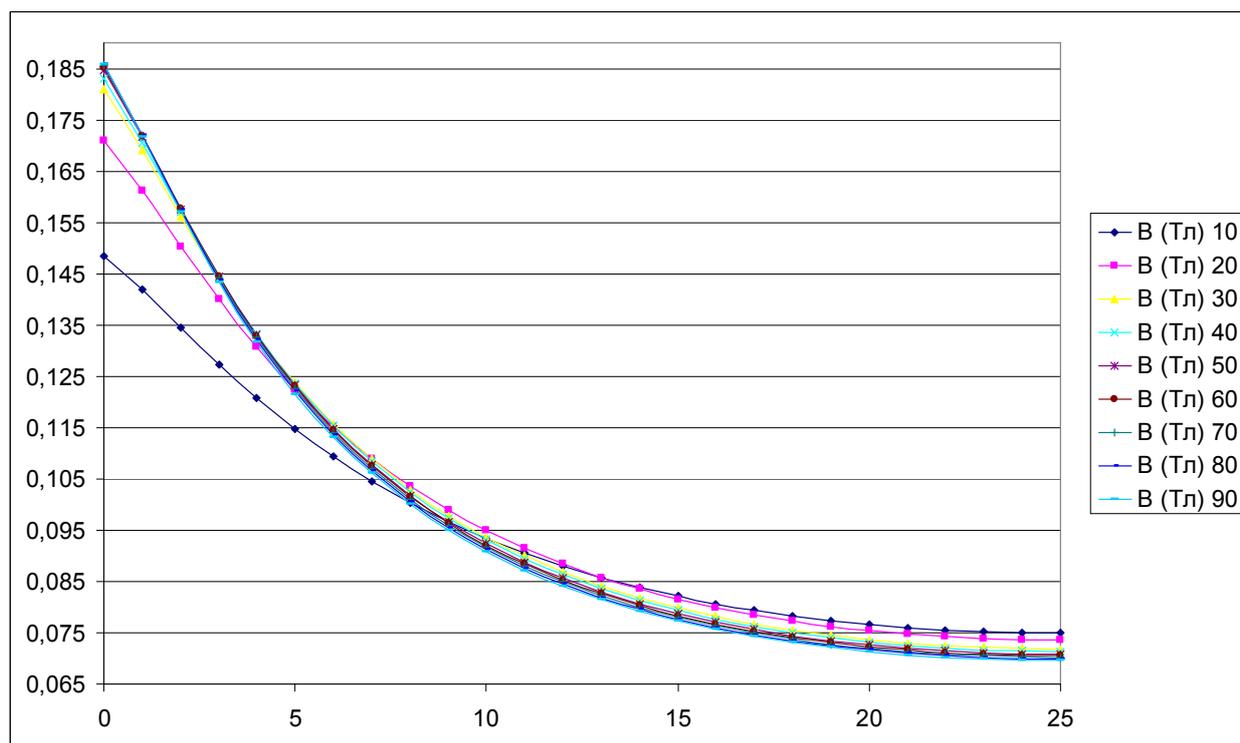


Рисунок Д2 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.10.5.1

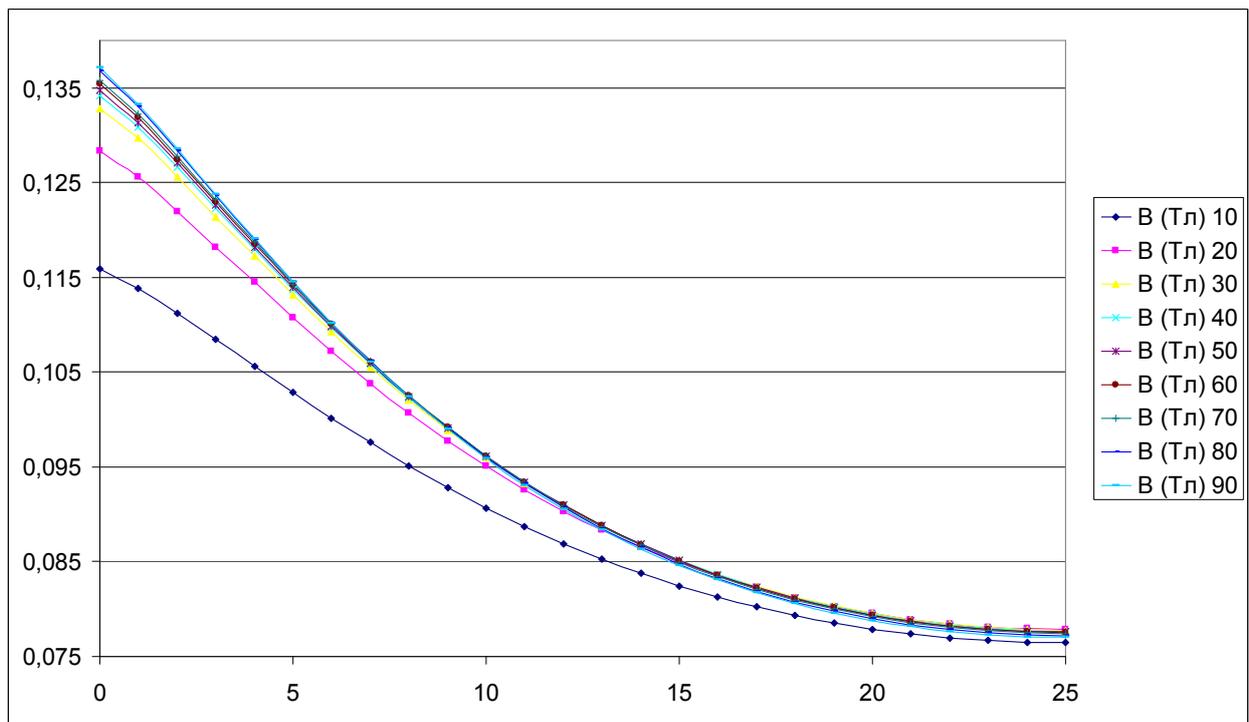


Рисунок Д3 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.20.5.1

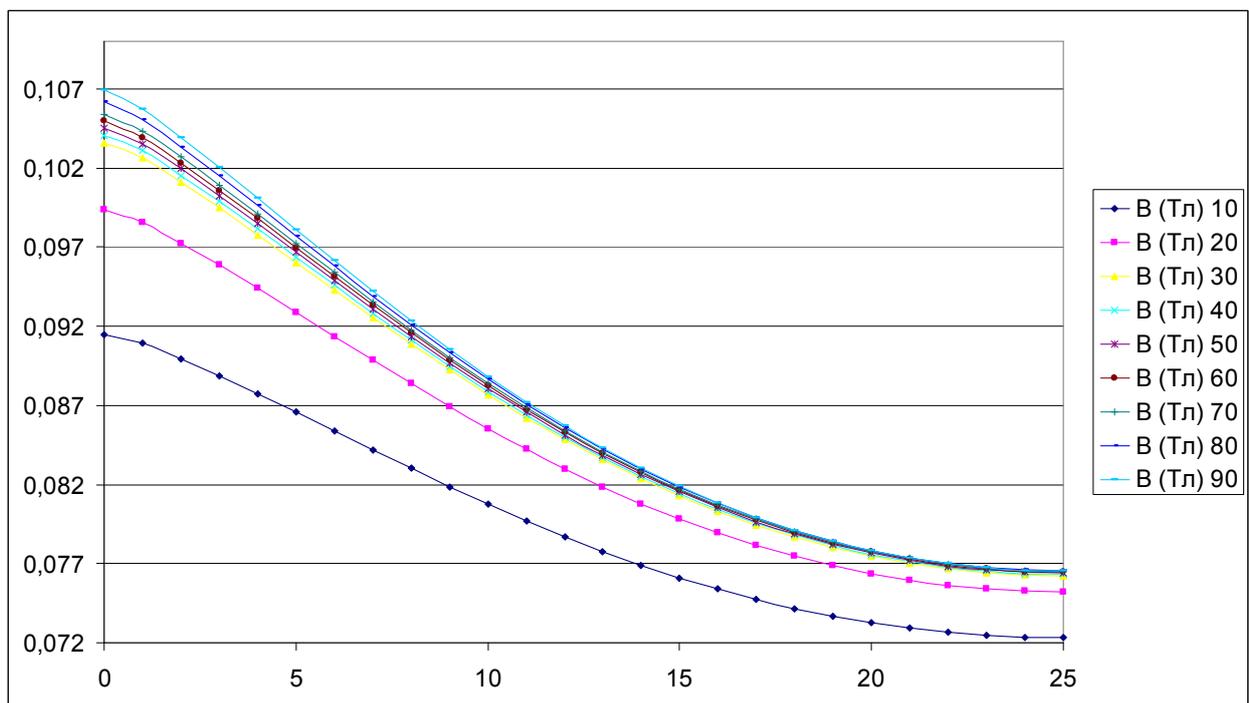


Рисунок Д4 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.30.5.1

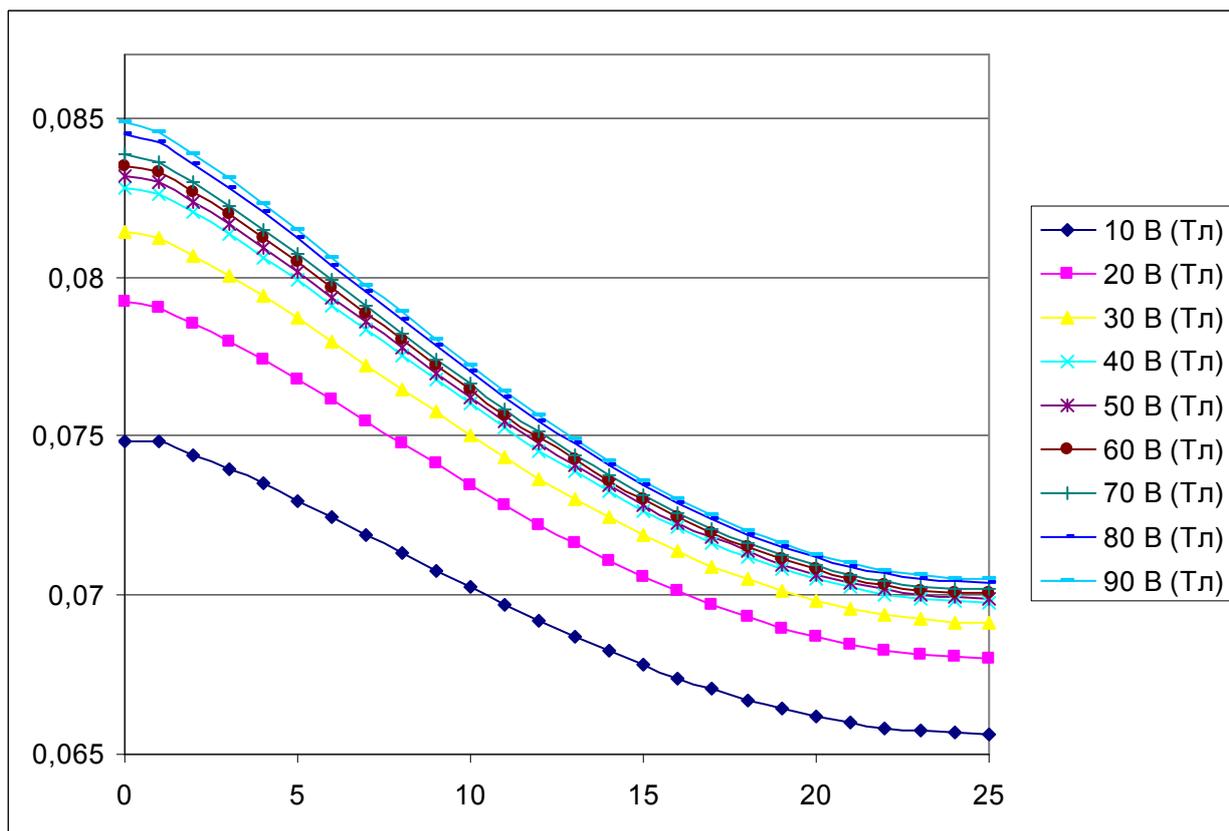


Рисунок Д5 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.40.5.1

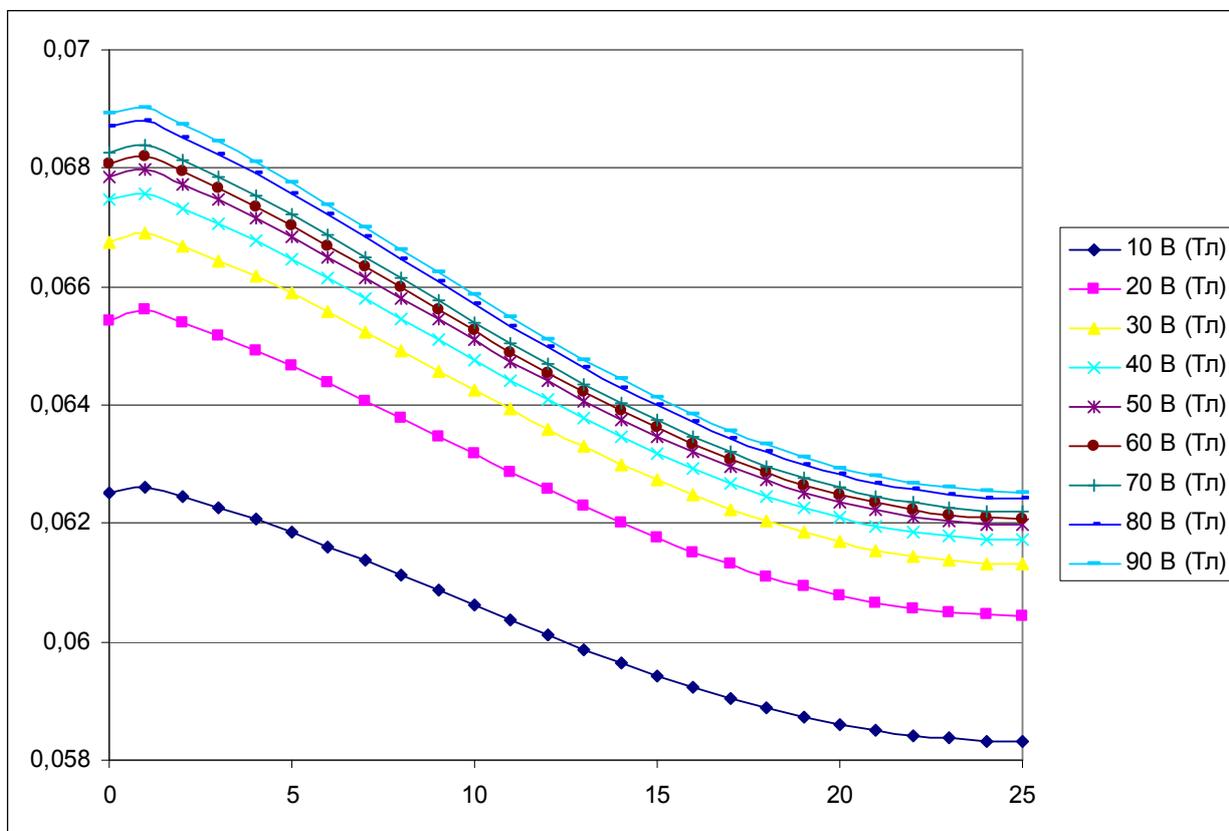


Рисунок Д6 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.50.5.1

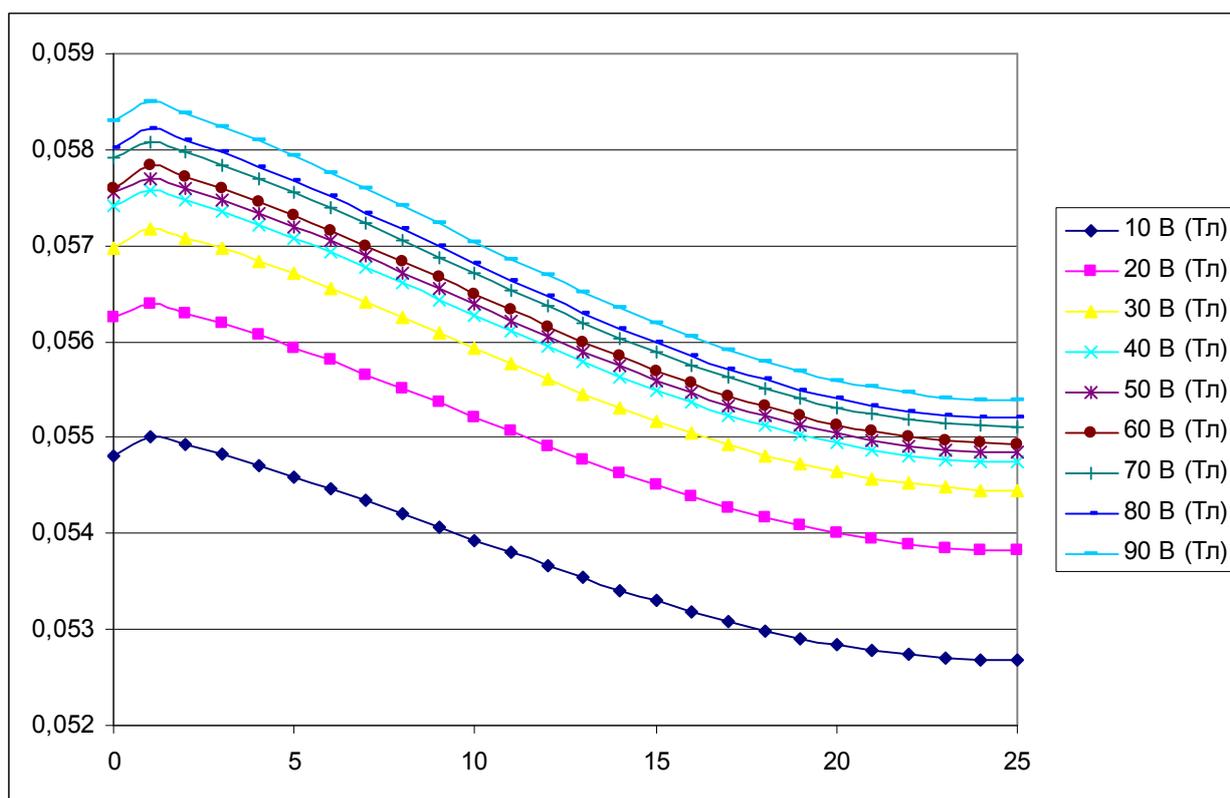


Рисунок Д7 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.60.5.1

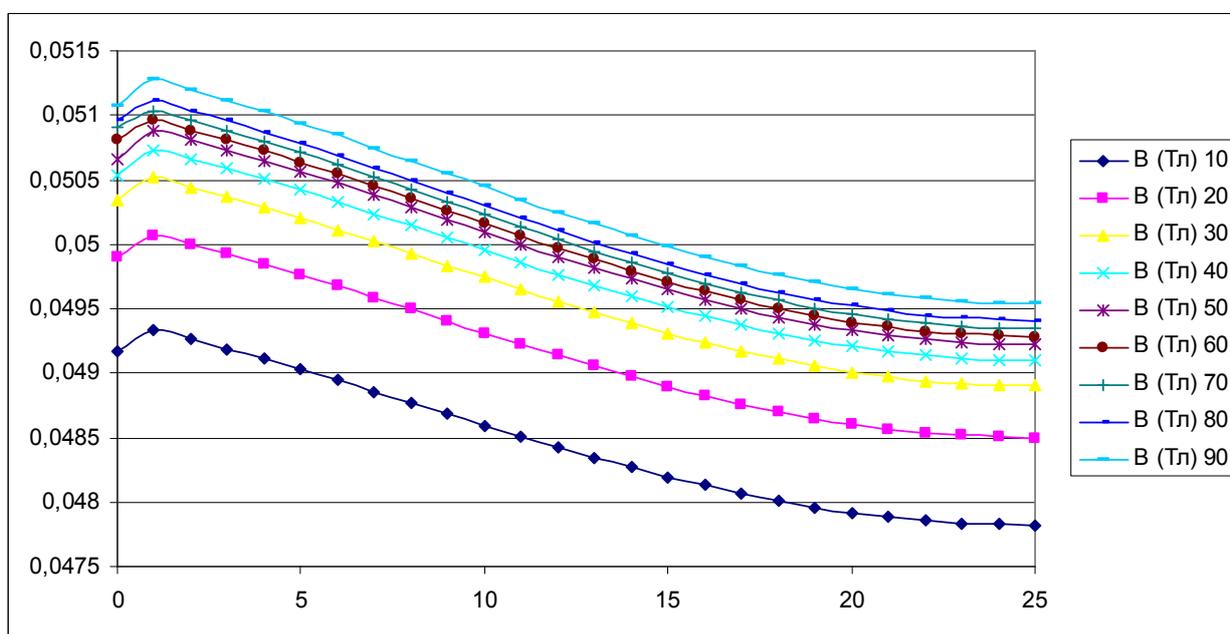


Рисунок Д8 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.70.5.1

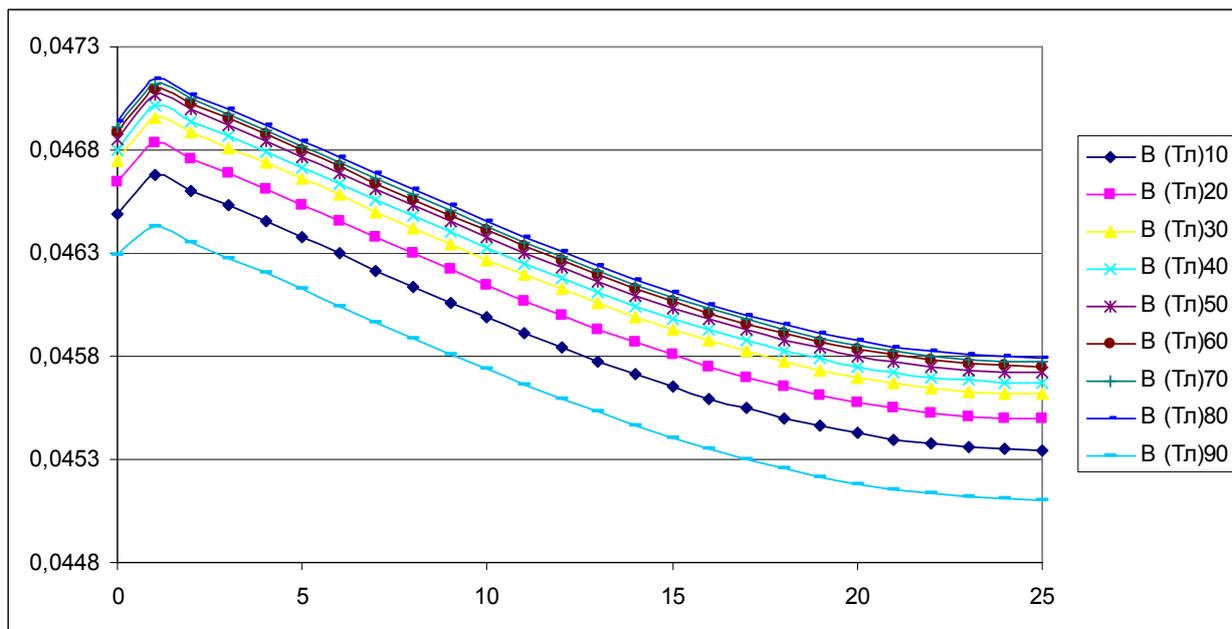


Рисунок Д9 – Зависимость изменения магнитной индукции (B , Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.1.а.80.5.1

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты расчета двухкатушечного АМОВ

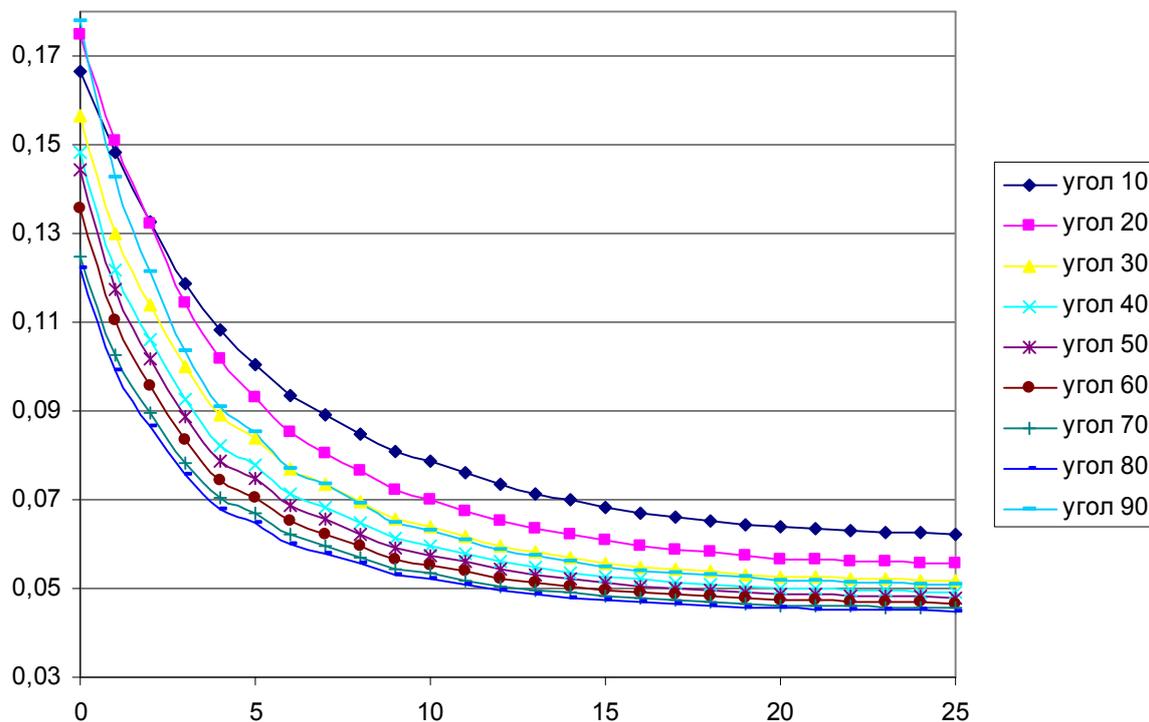


Рисунок Е1 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в функции радиуса АМОВ 50.2.а.0.5.1

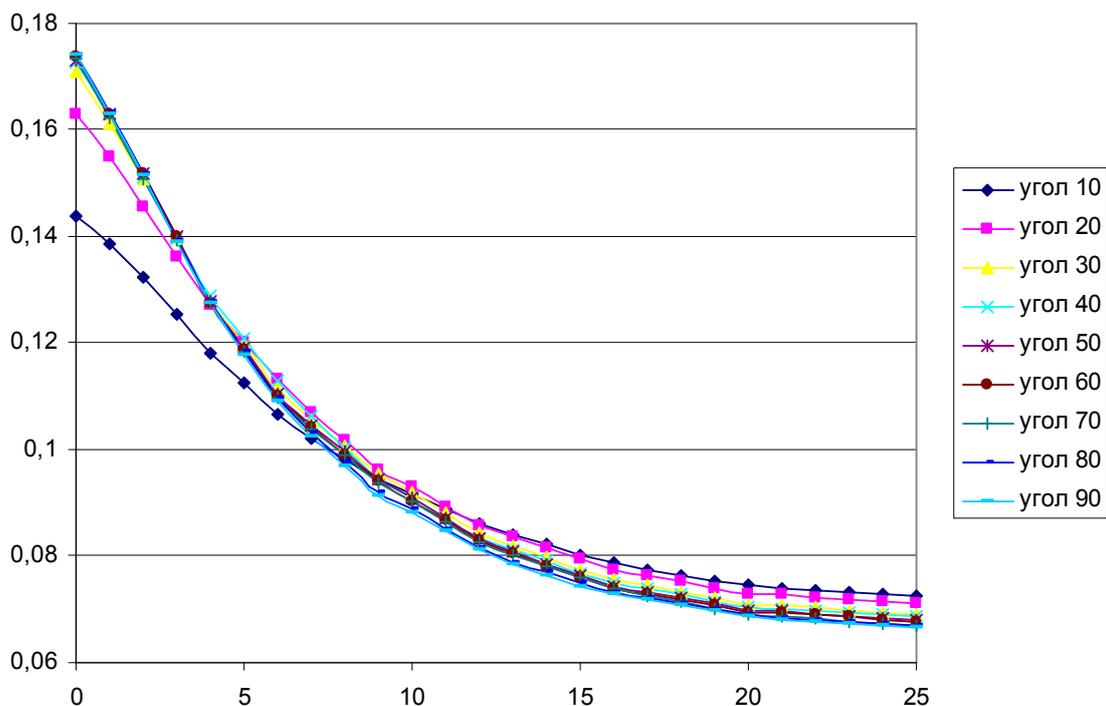


Рисунок Е2 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.10.5.1

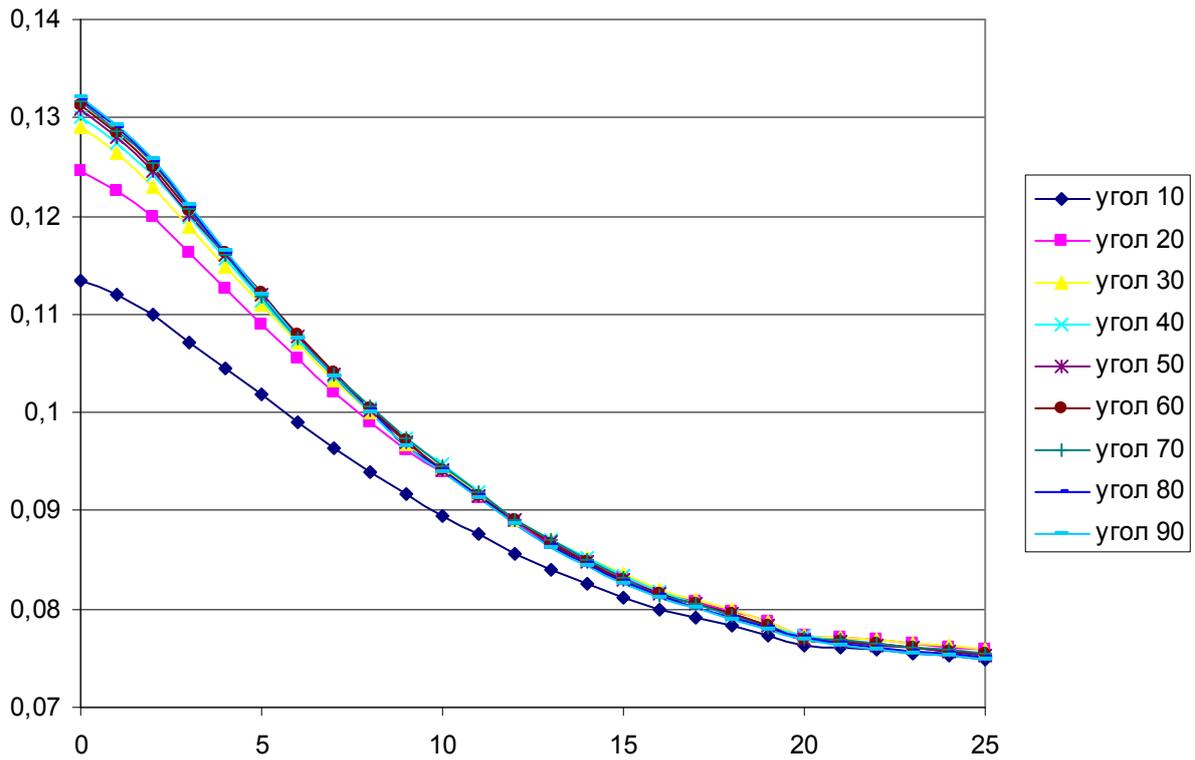


Рисунок Е3 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.20.5.1

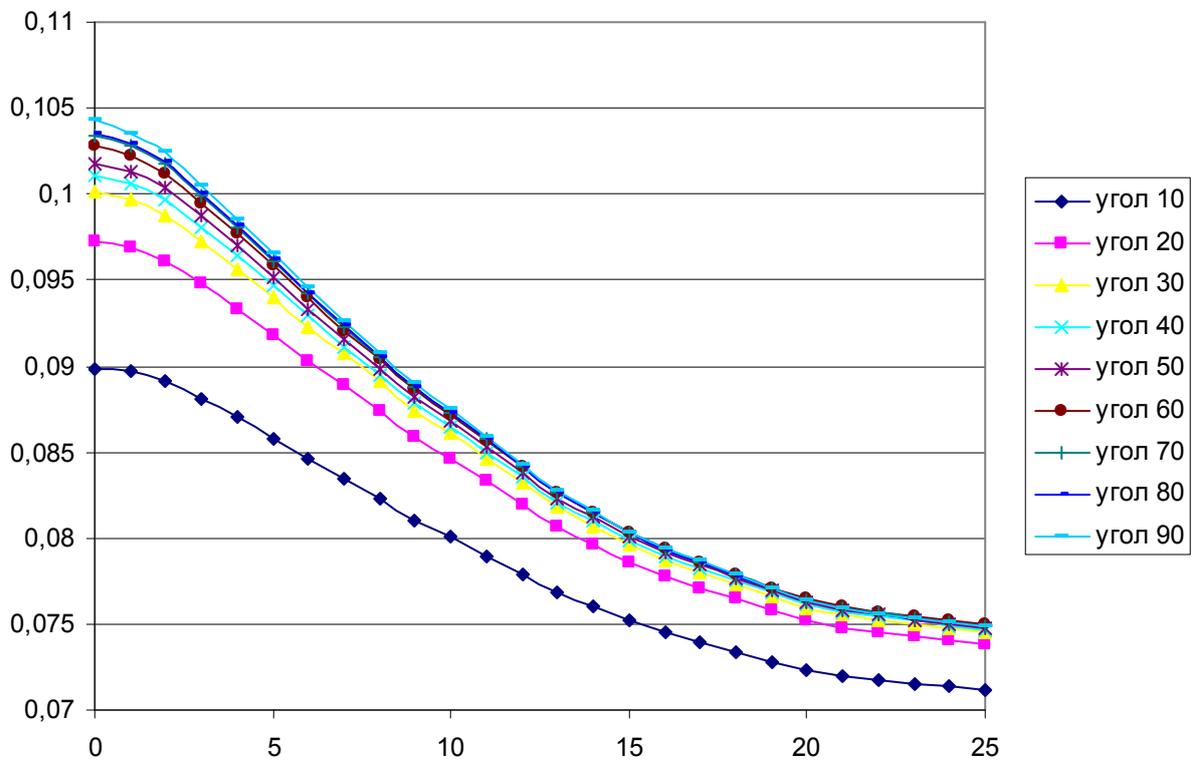


Рисунок Е4 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.30.5.1

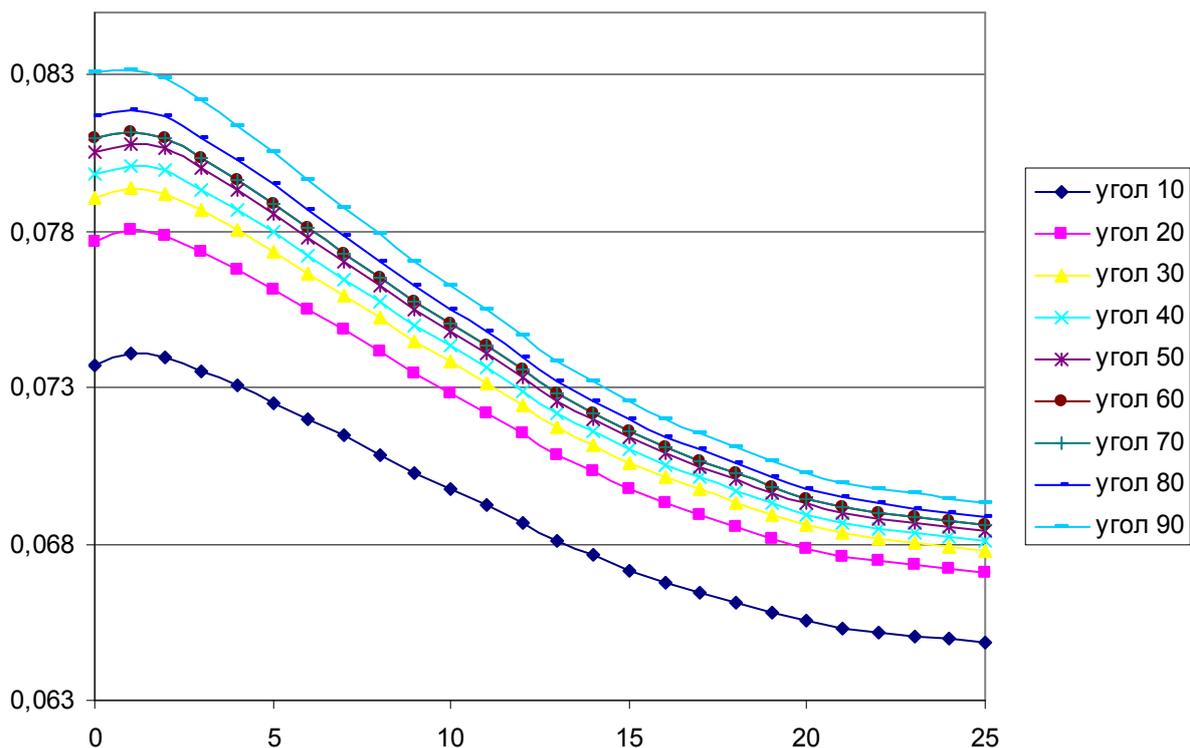


Рисунок Е5 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.40.5.1

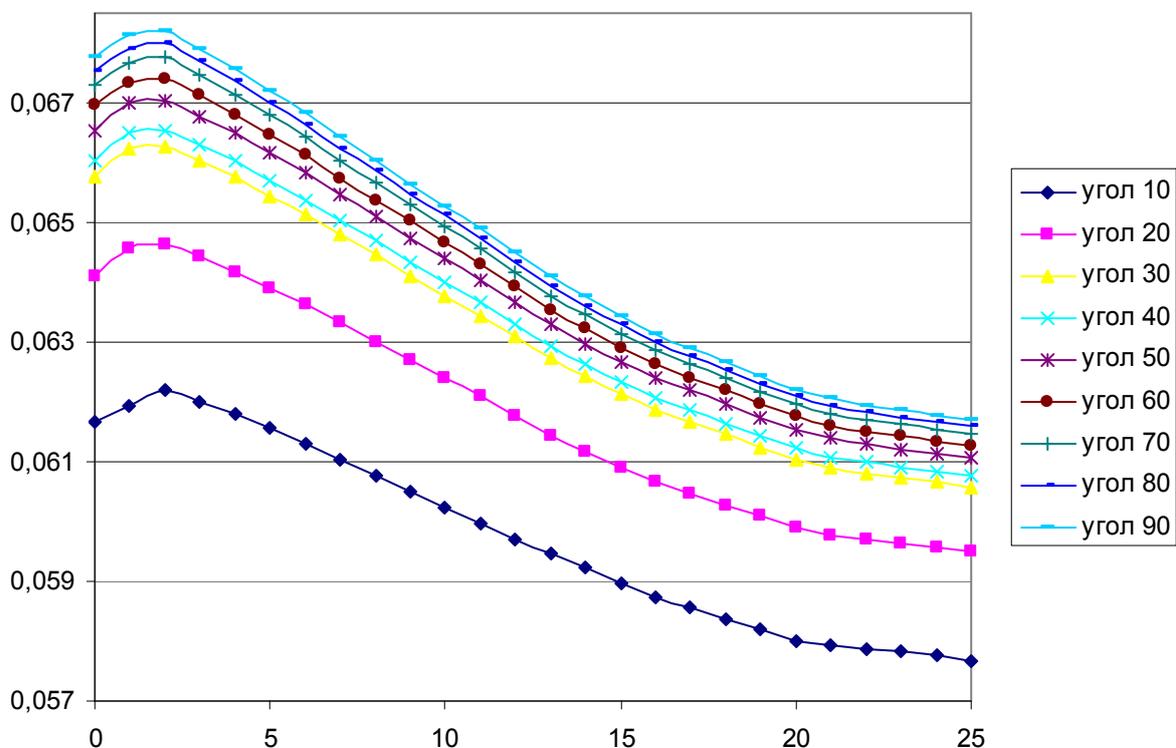


Рисунок Е6 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.50.5.1

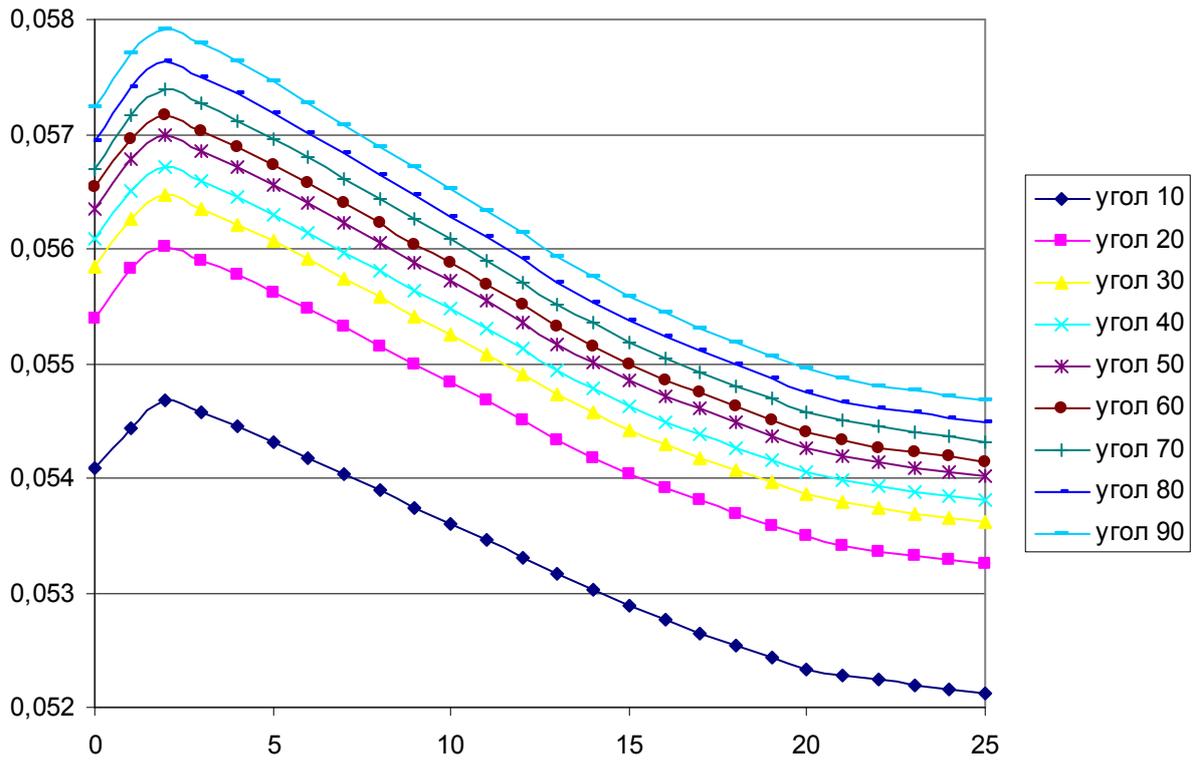


Рисунок Е7 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.60.5.1

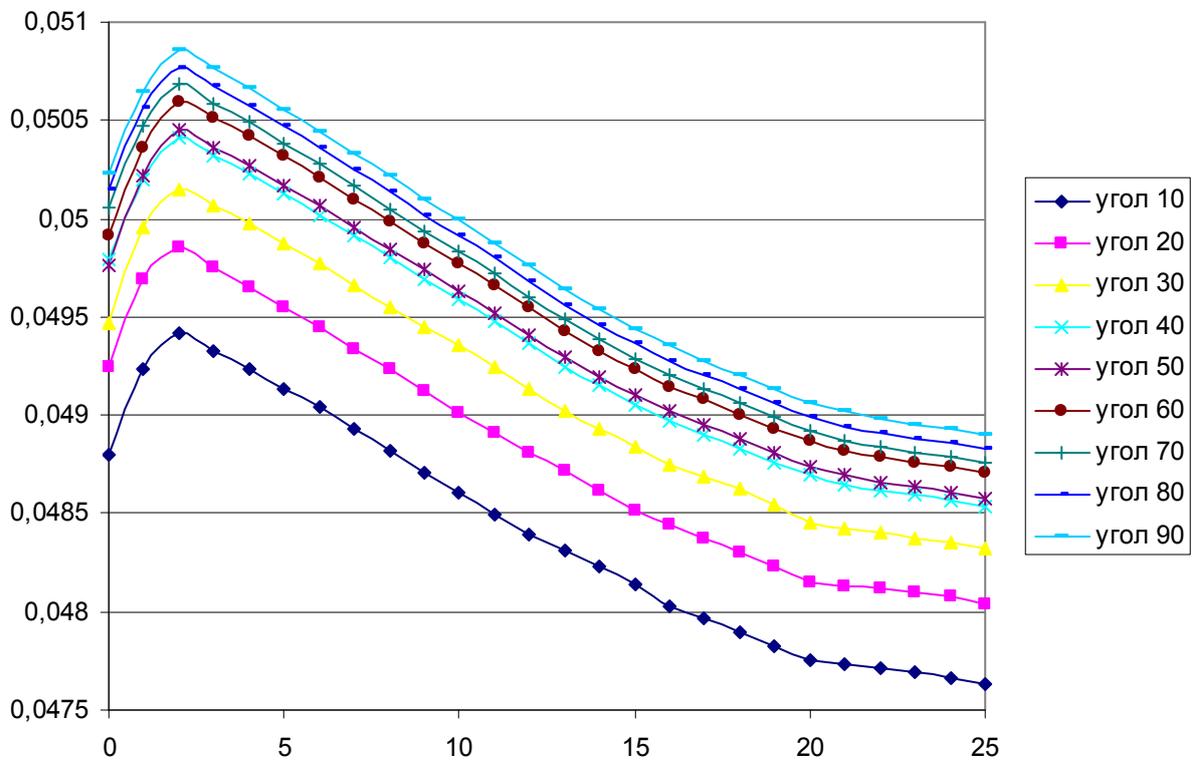


Рисунок Е8 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.70.5.1

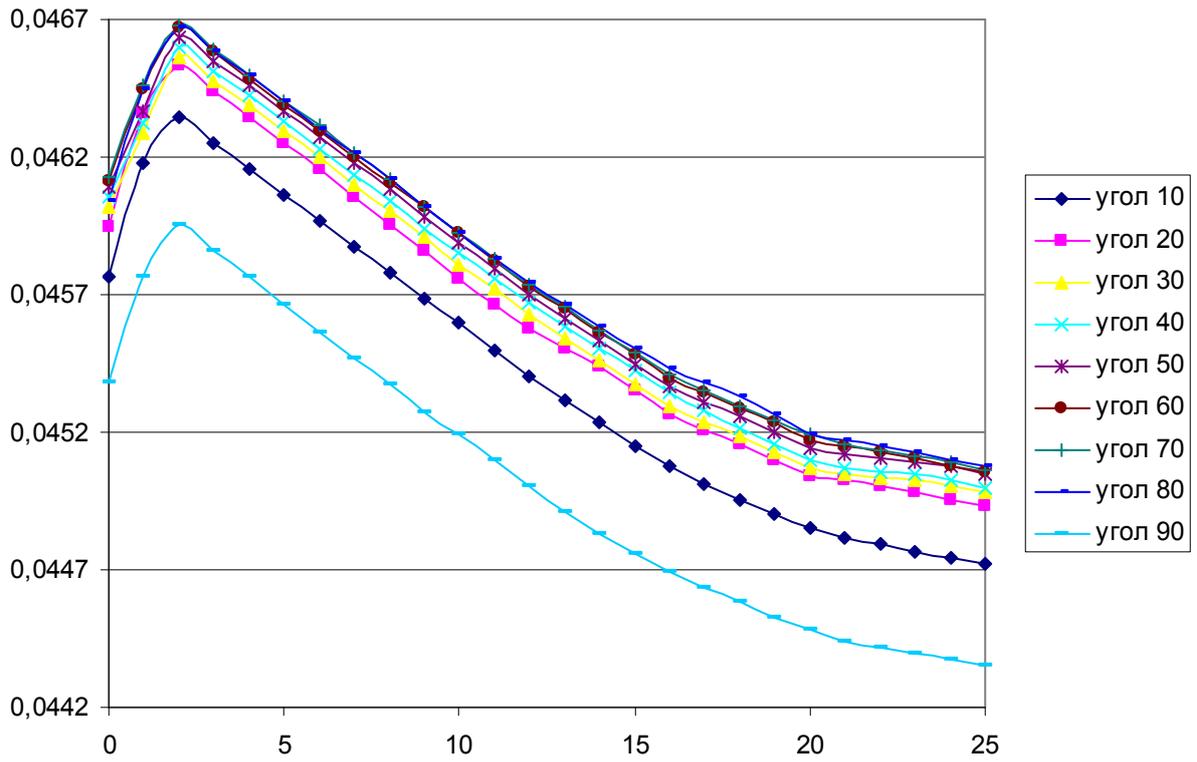
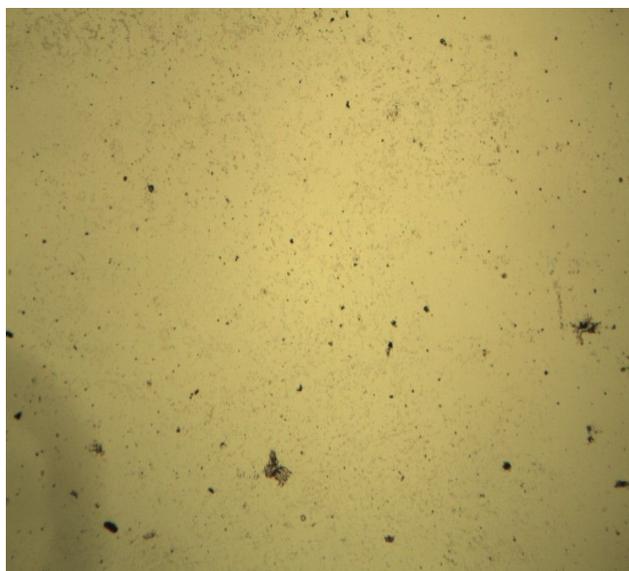


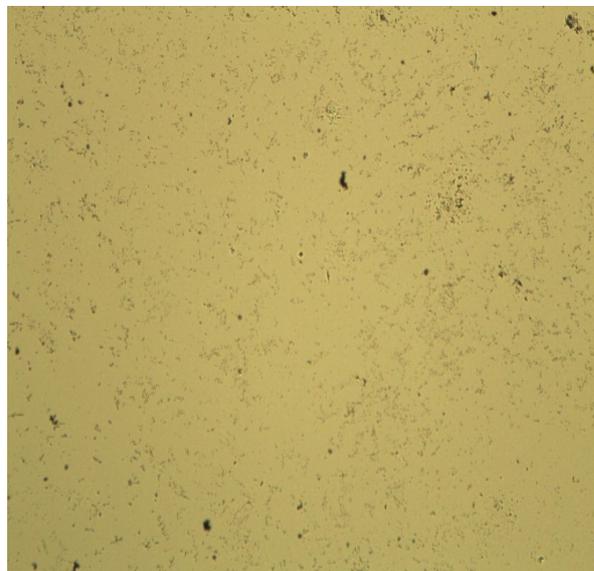
Рисунок Е9 – Зависимость изменения магнитной индукции (В, Тл) в радиальном направлении АМОВ 50.2.а.80.5.1

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

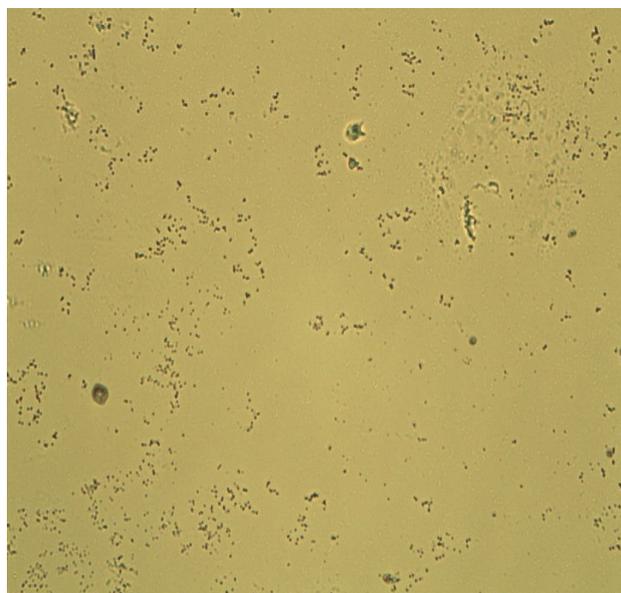
Результаты экспериментальных исследований однокатушечного аппарата магнитной обработки воды



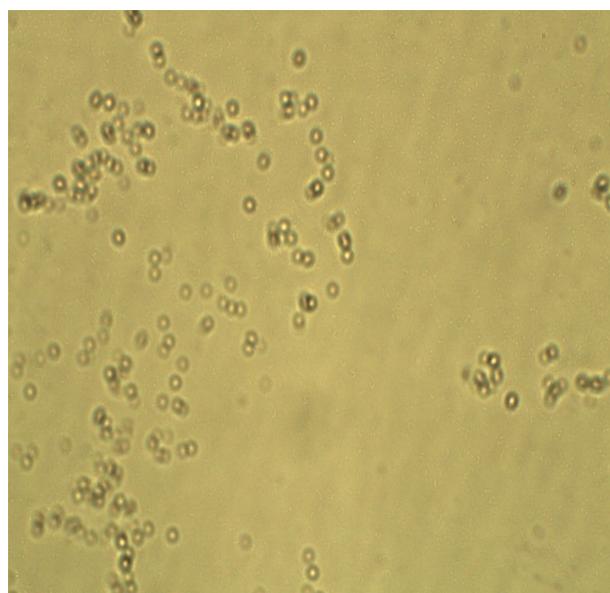
а



б

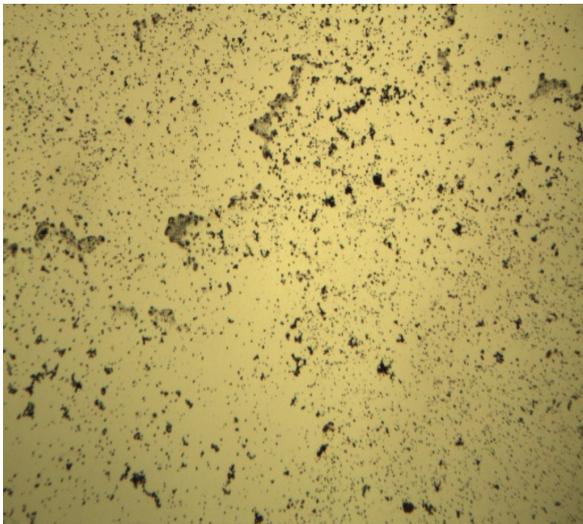


в

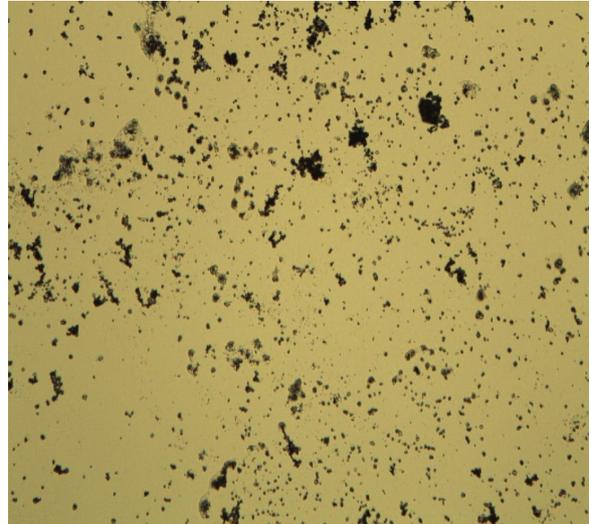


г

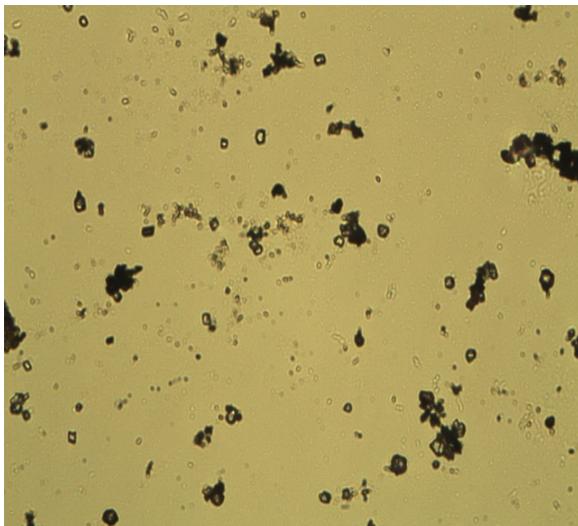
**Рисунок Ж1 – Кристаллы соли выпавшей в осадок в необработанной воде:
а–увеличение 4х; б–увеличение 10х; в–увеличение 40х; г–увеличение 100х**



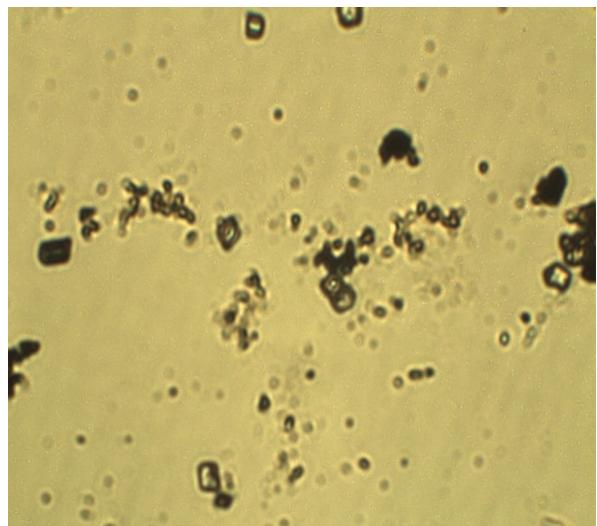
а



б

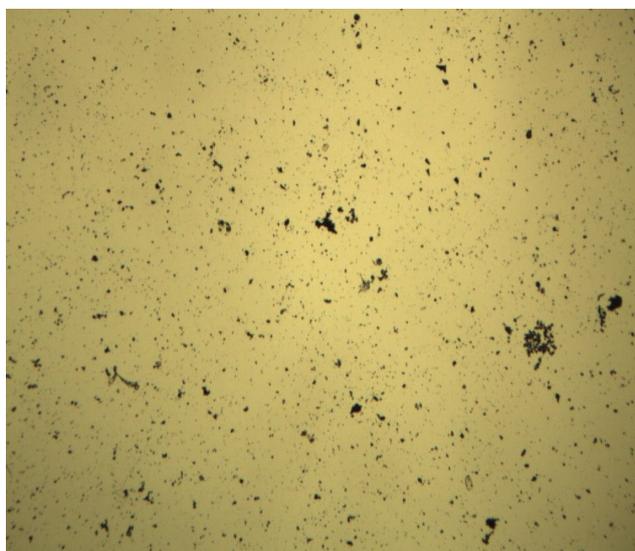


в

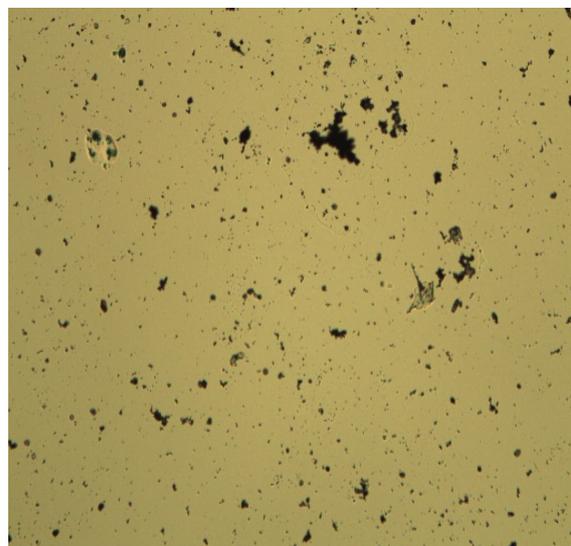


г

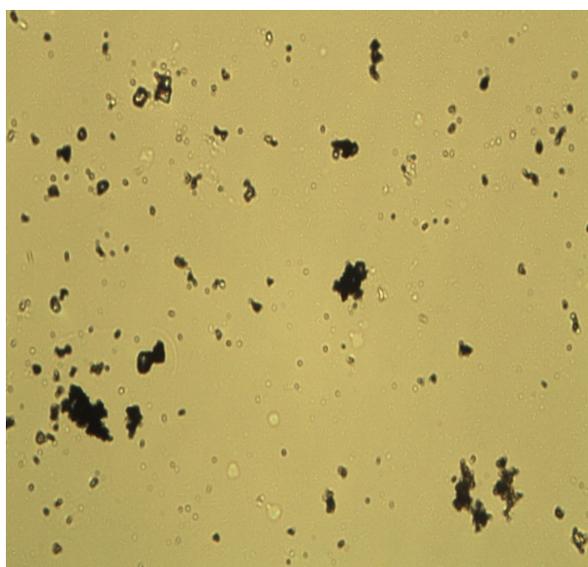
Рисунок Ж2 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 1: а–увеличение 4х; б–увеличение 10х; в–увеличение 40х; г–увеличение 100х



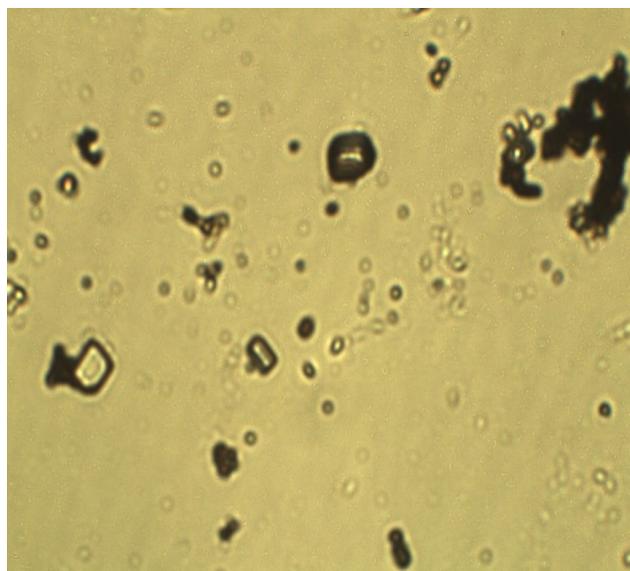
а



б

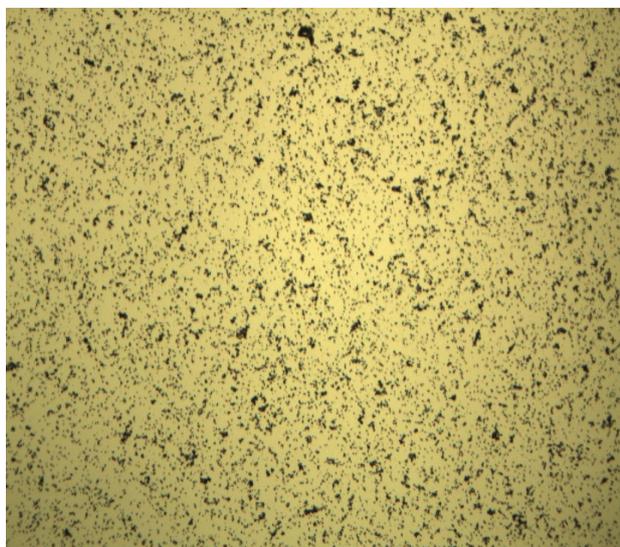


в

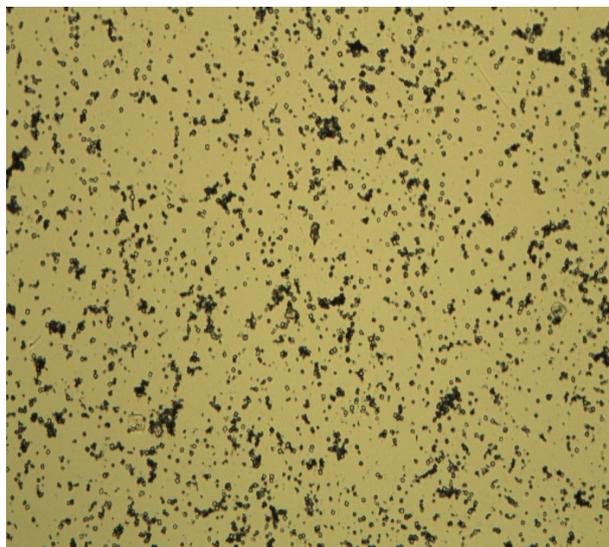


г

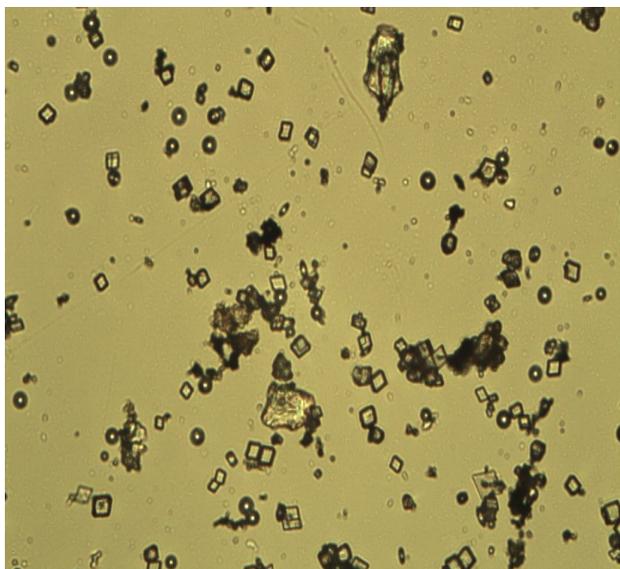
Рисунок ЖЗ – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 3: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



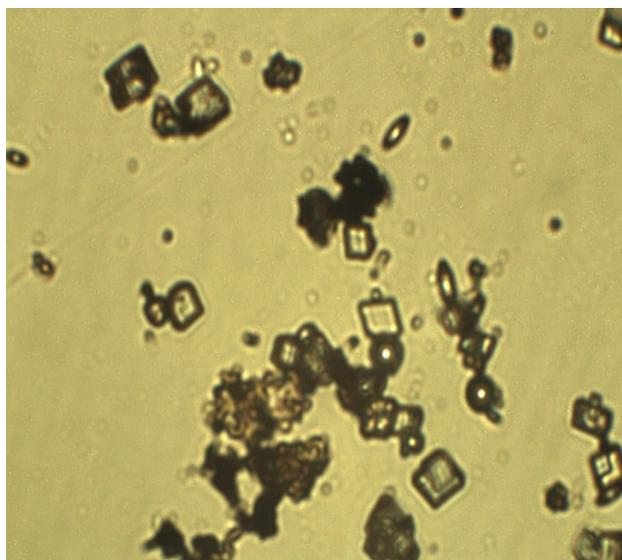
а



б

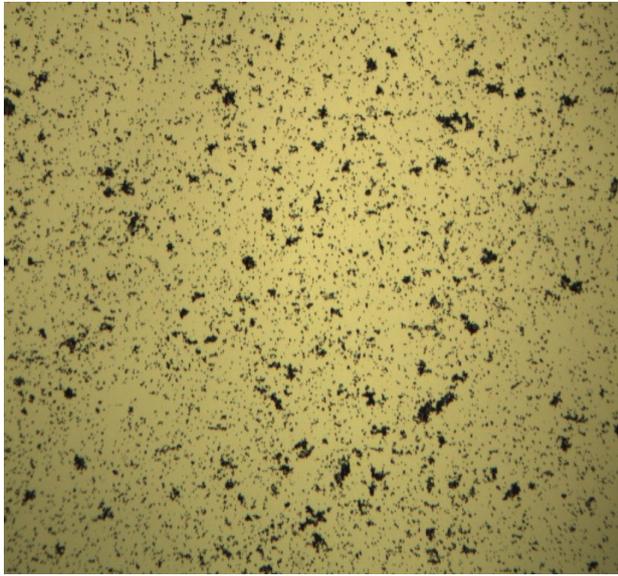


в

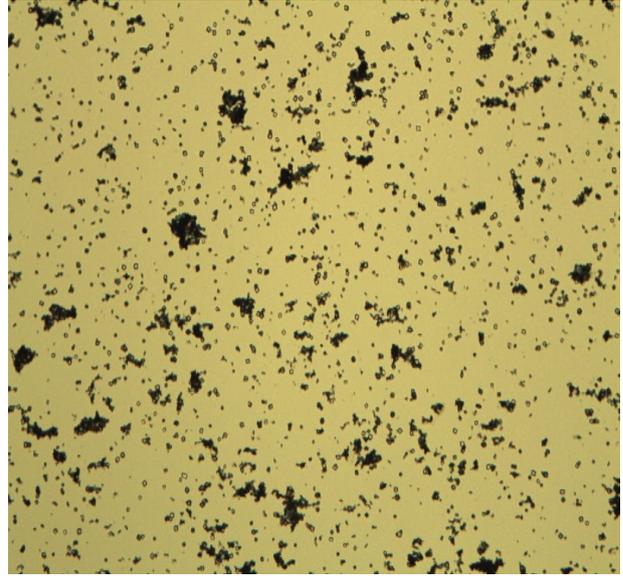


г

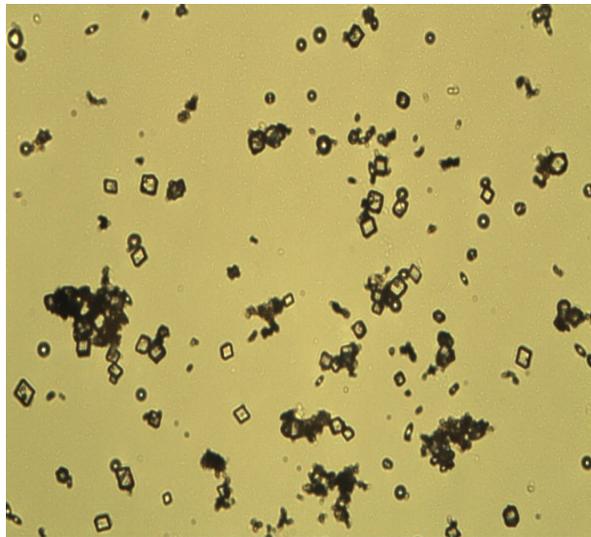
Рисунок Ж4 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки б: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



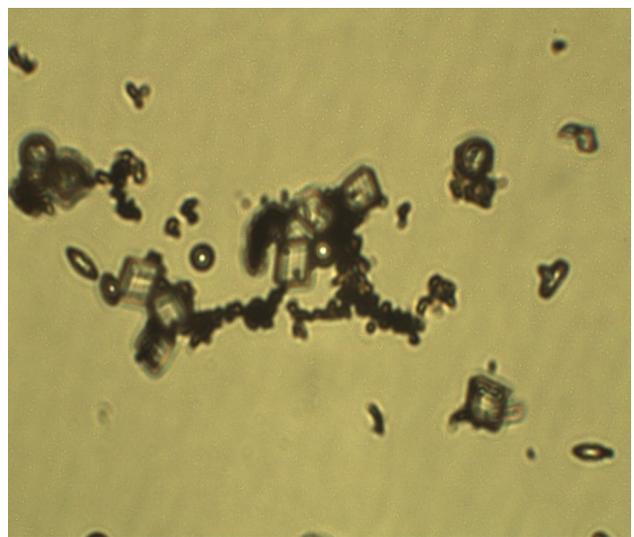
а



б

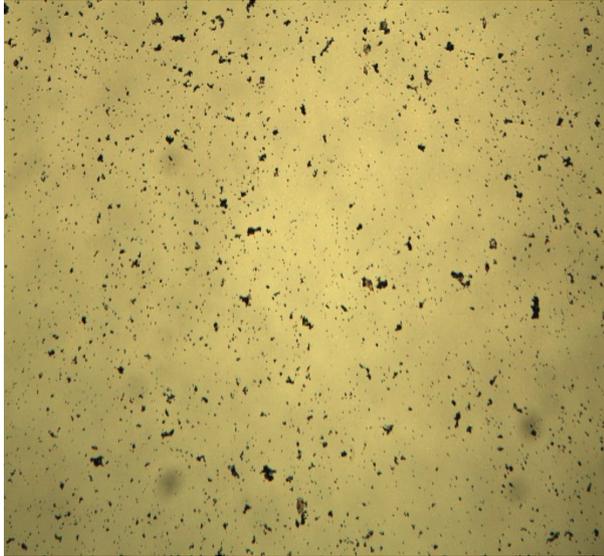


в

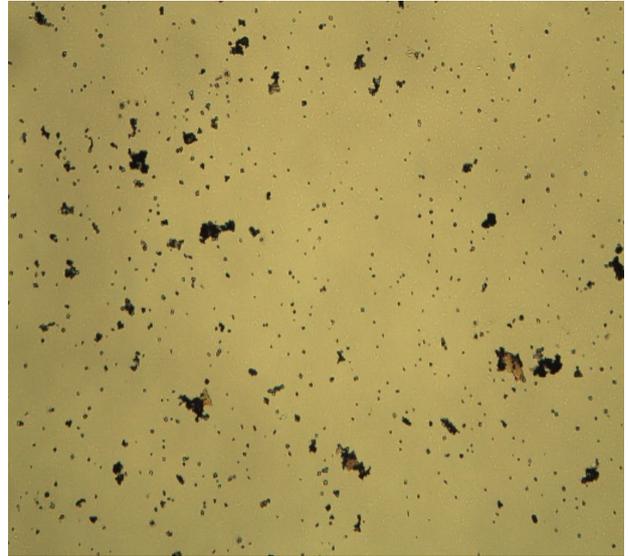


г

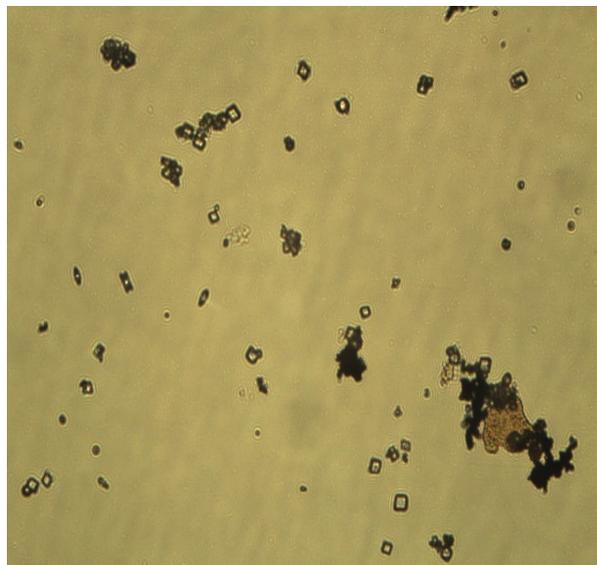
Рисунок Ж5 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 9: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б

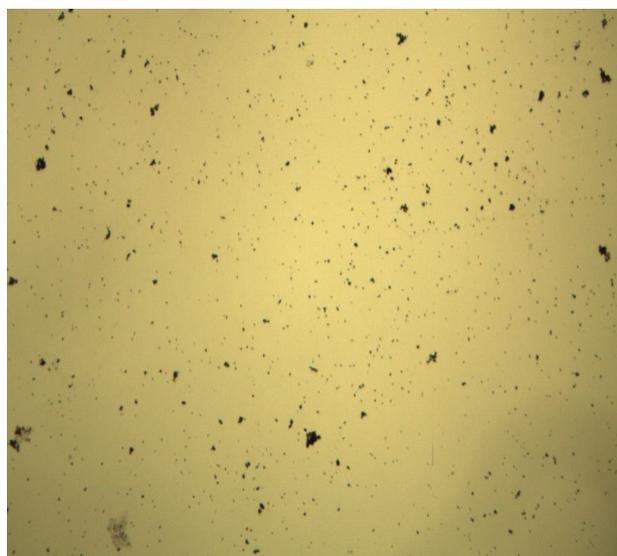


в

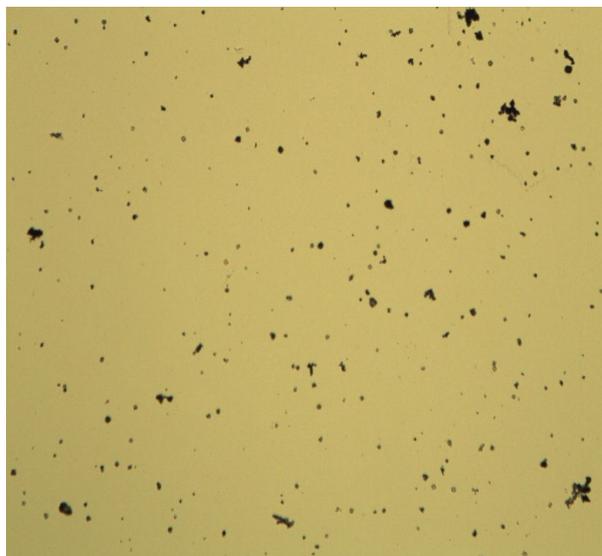


г

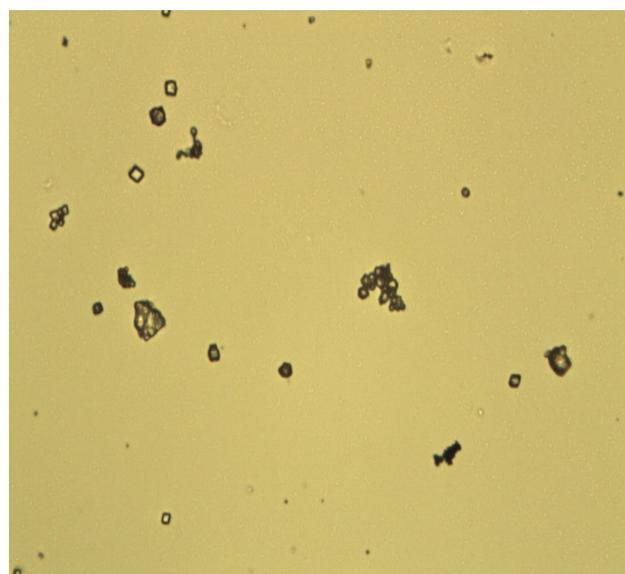
Рисунок Ж6 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 12: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б

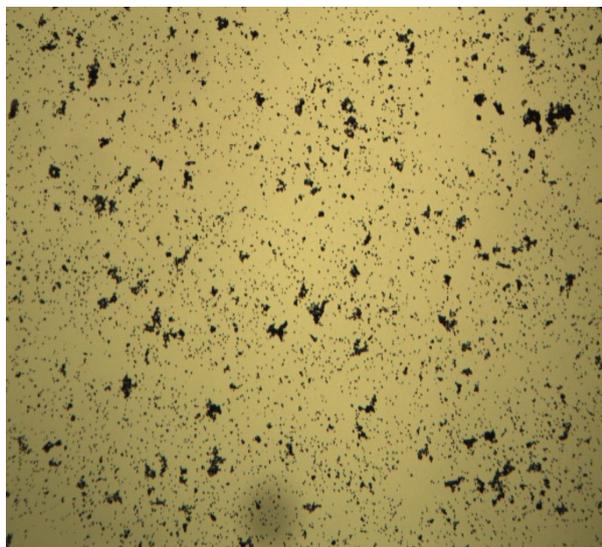


в

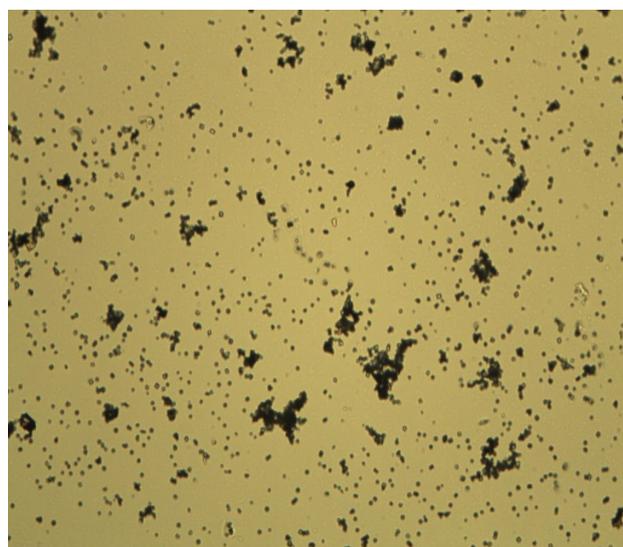


г

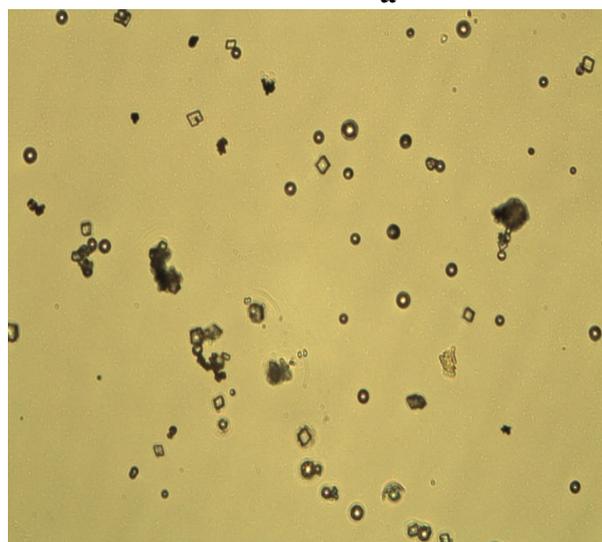
Рисунок Ж7 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 15: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



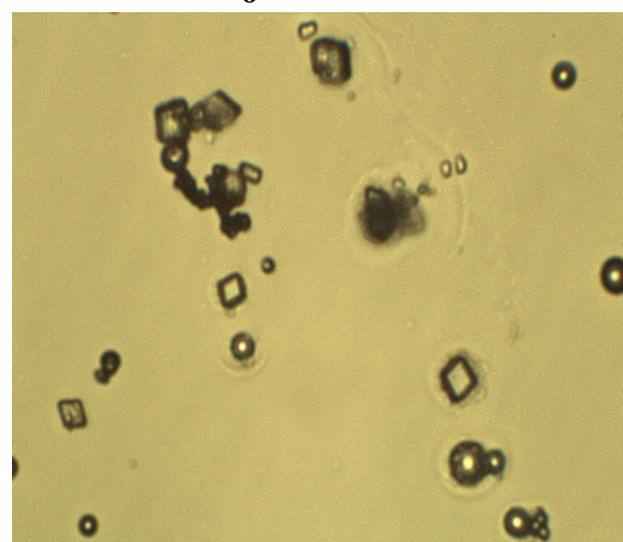
а



б

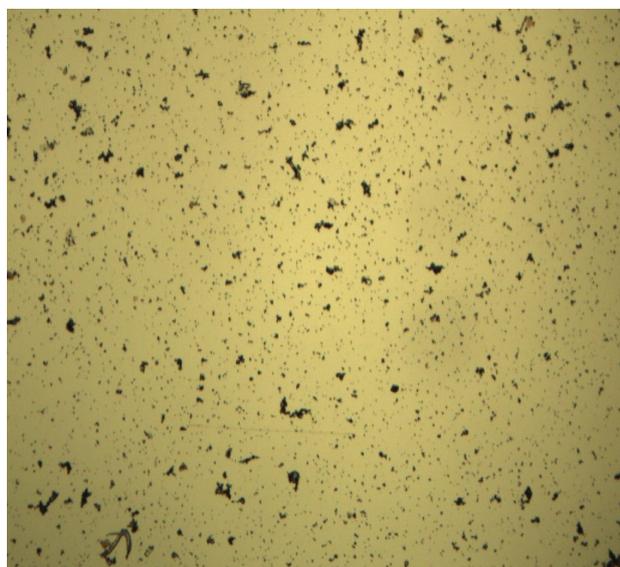


в

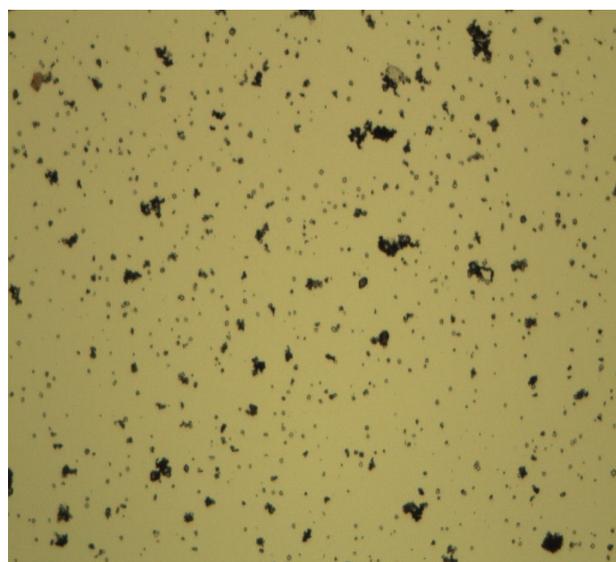


г

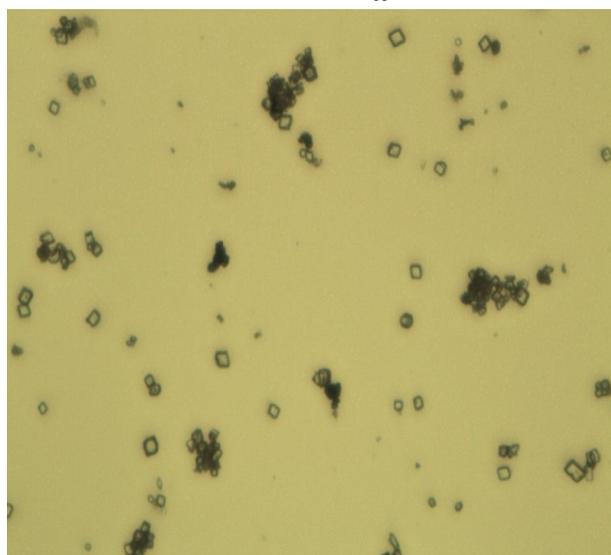
Рисунок Ж8 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 18: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



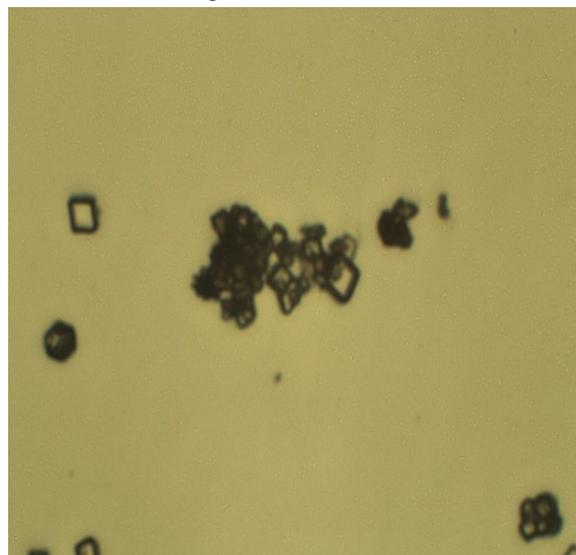
а



б

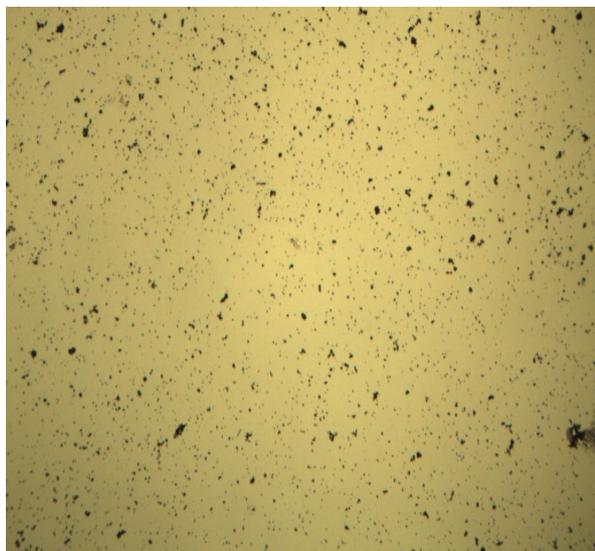


в

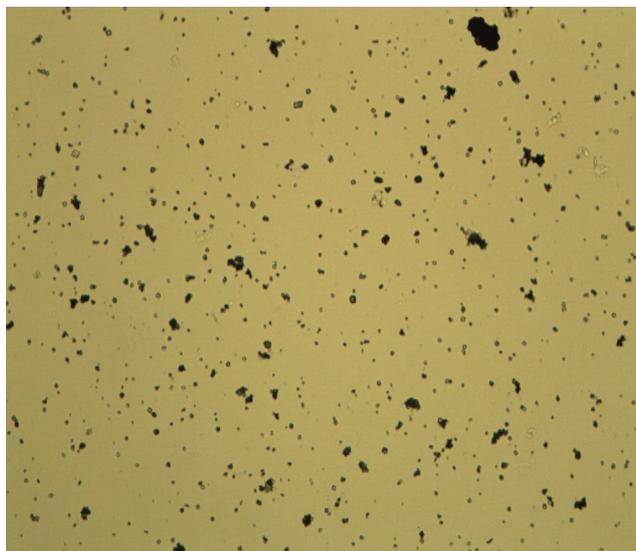


г

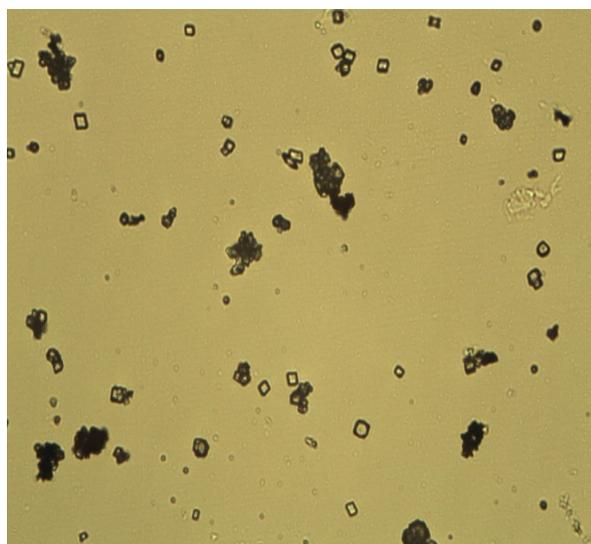
Рисунок Ж9 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 21: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б

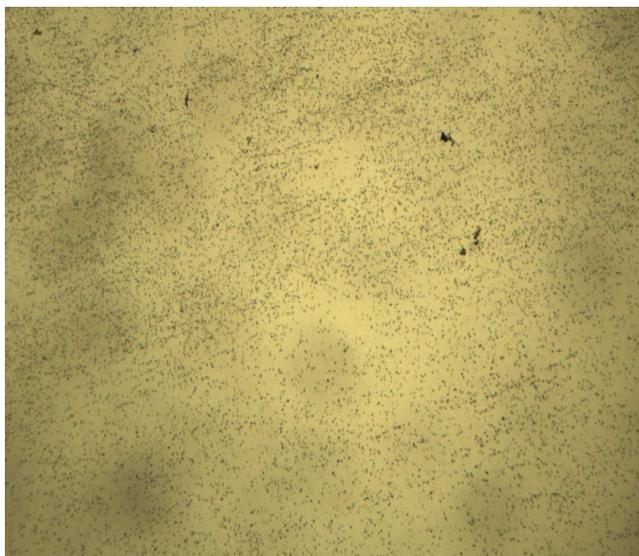


в

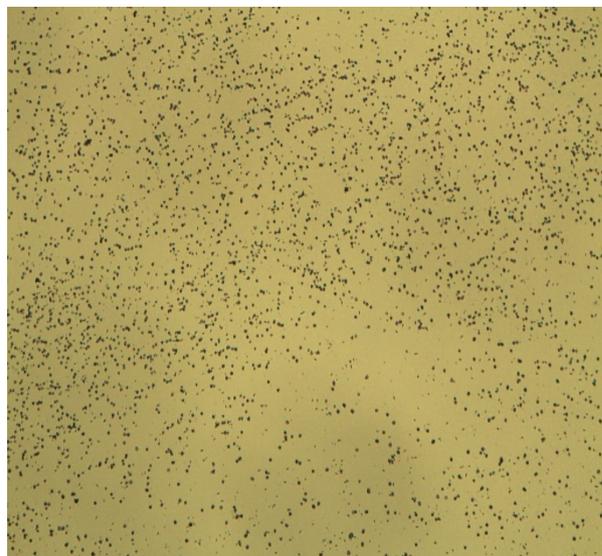


г

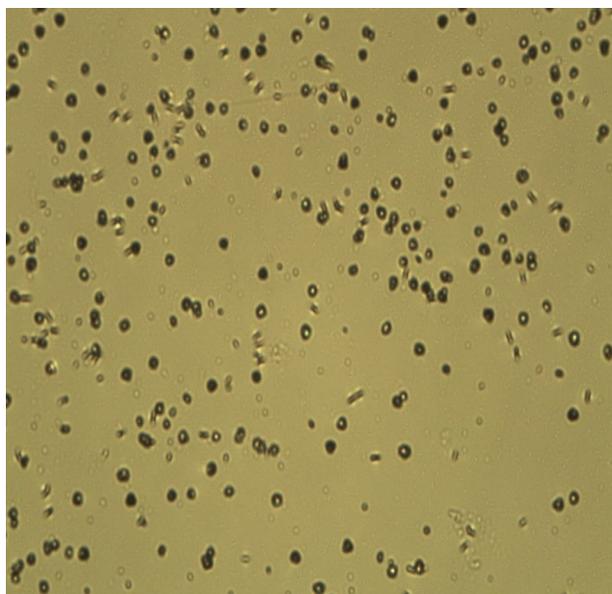
Рисунок Ж10 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 24: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



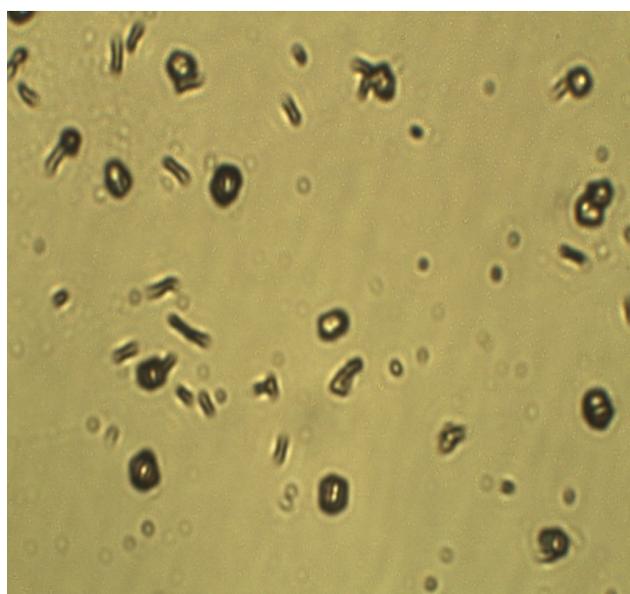
а



б

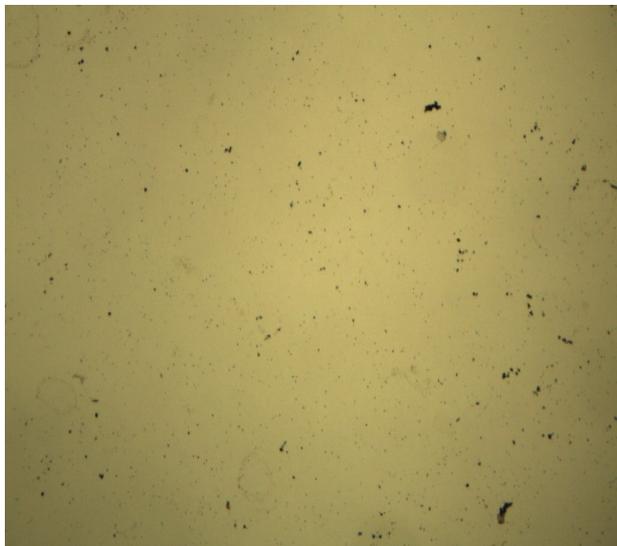


в

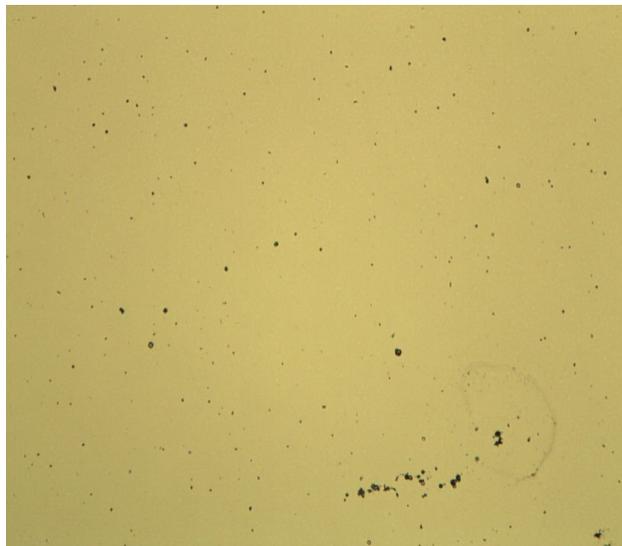


г

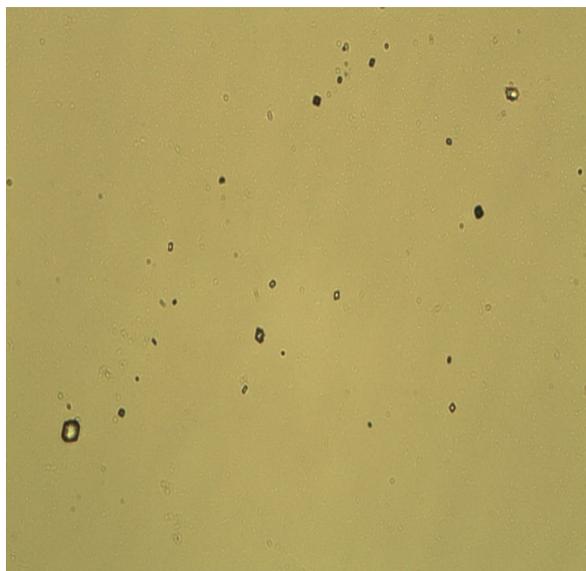
Рисунок Ж11 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 27: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



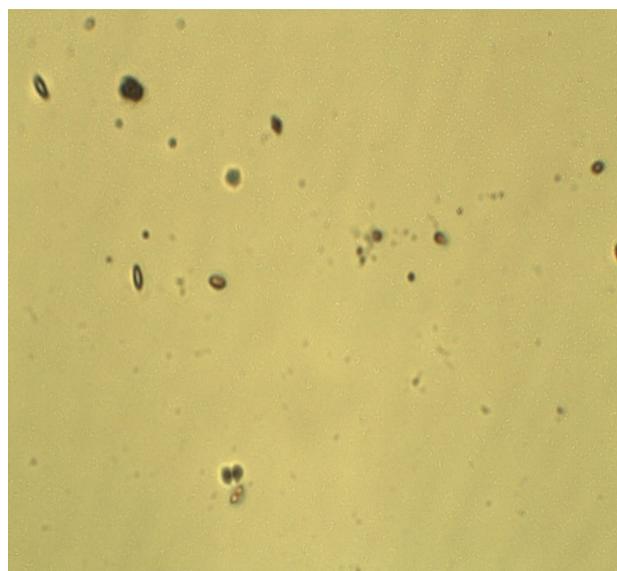
а



б

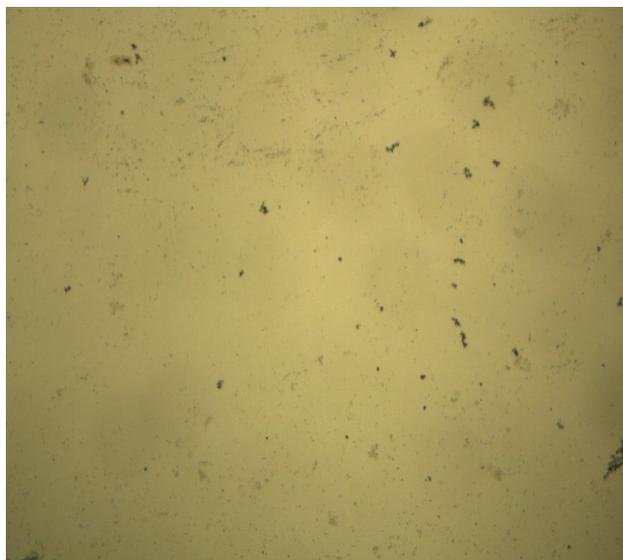


в

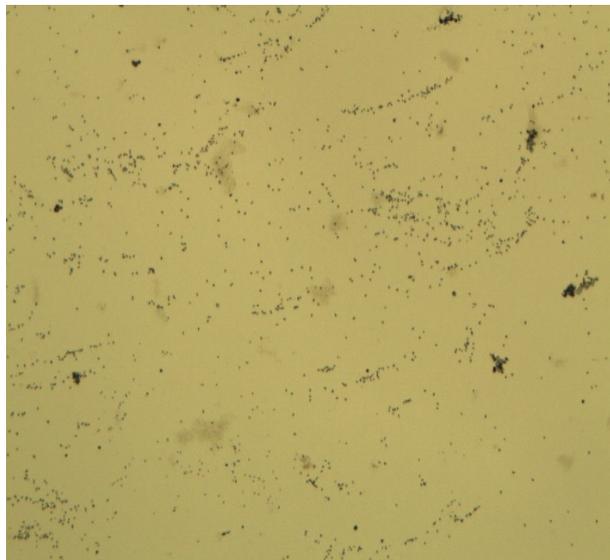


г

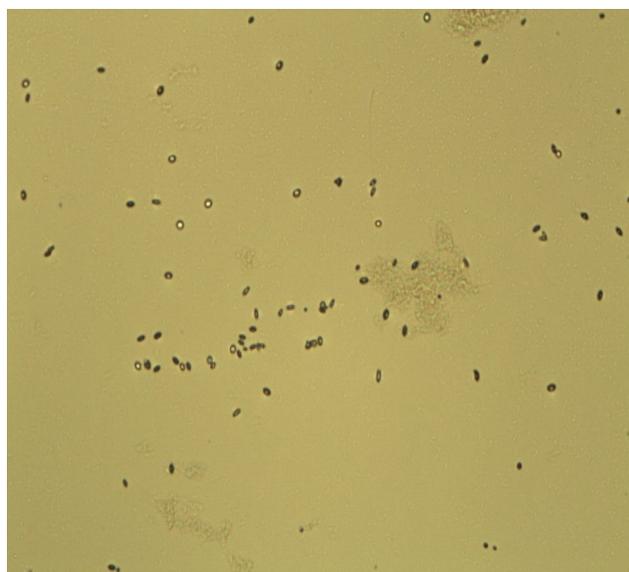
Рисунок Ж12 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 30: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



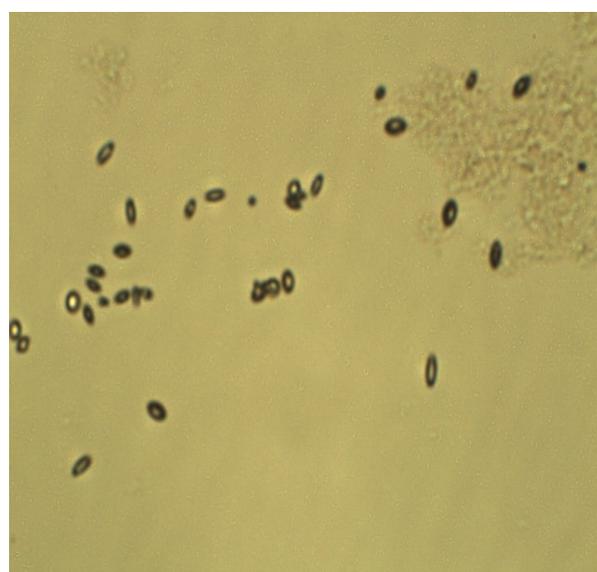
а



б

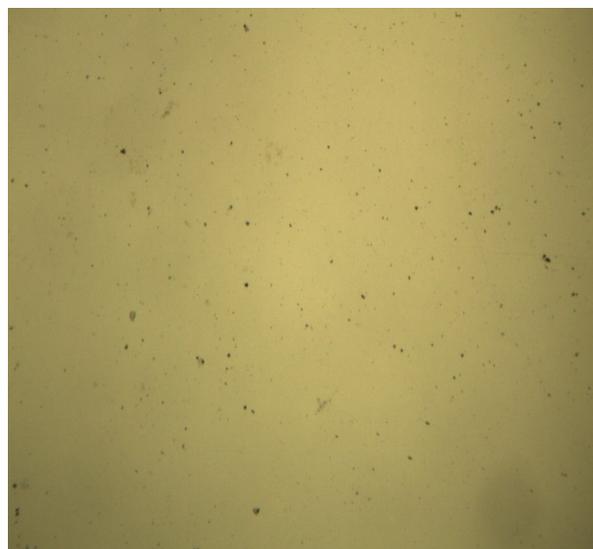


в

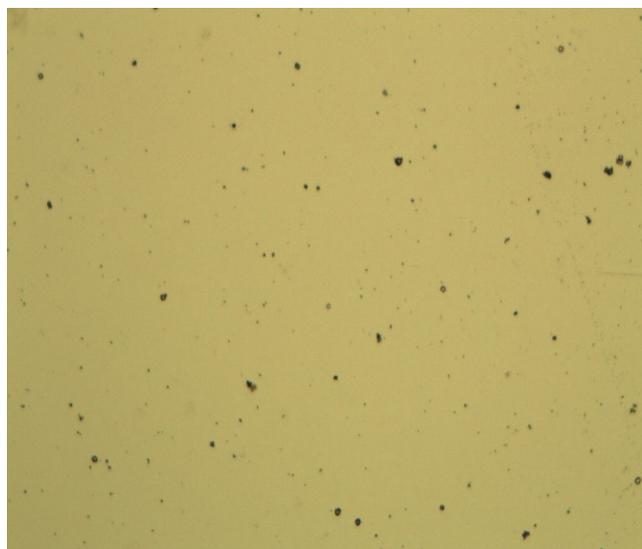


г

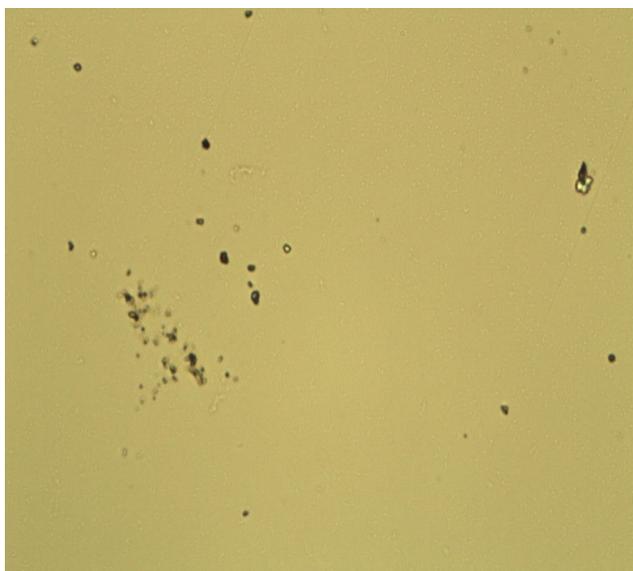
Рисунок Ж13 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 50: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б



в

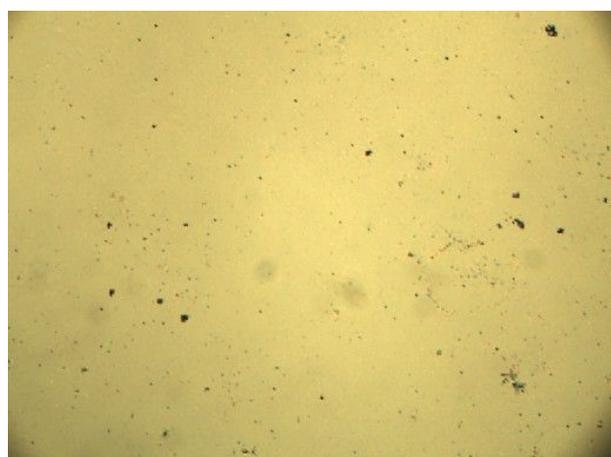


г

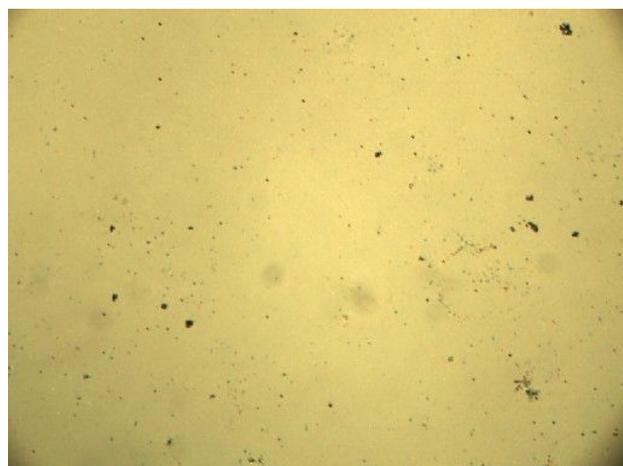
Рисунок Ж14 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 90: а–увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Результаты экспериментальных исследований двухкатушечного аппарата магнитной обработки воды



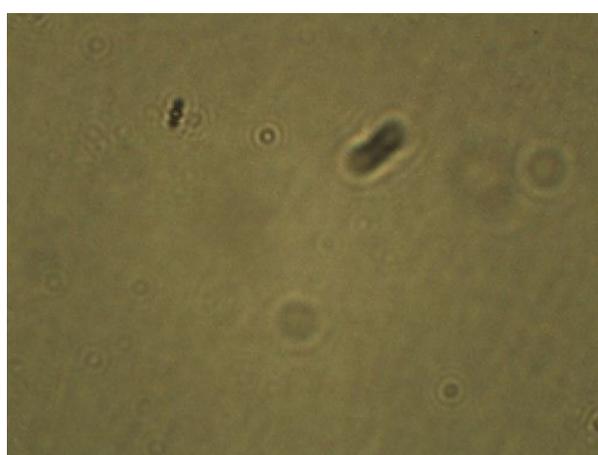
а



б

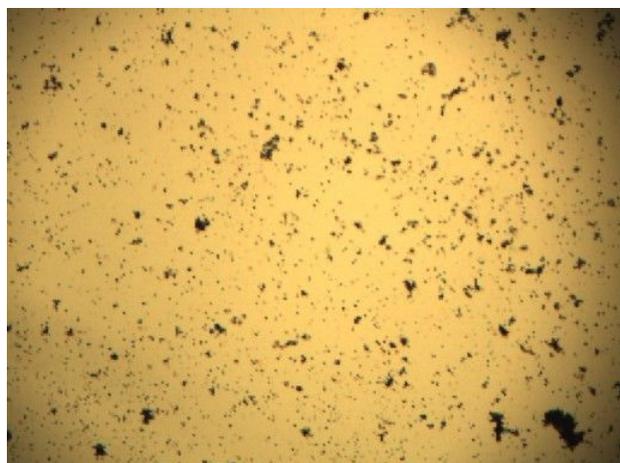


в

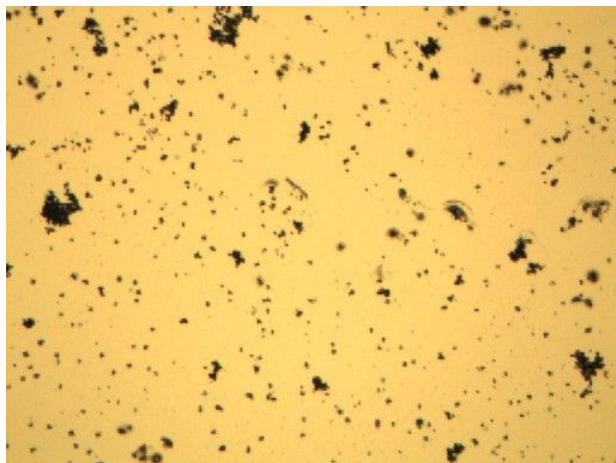


г

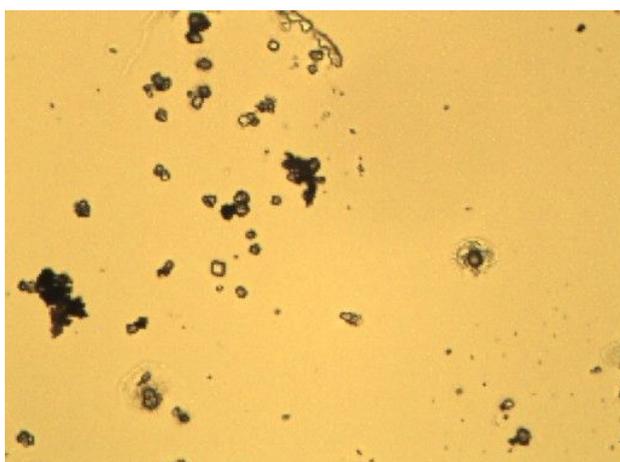
**Рисунок 31 – Кристаллы соли выпавшей в осадок в необработанной воде:
а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х**



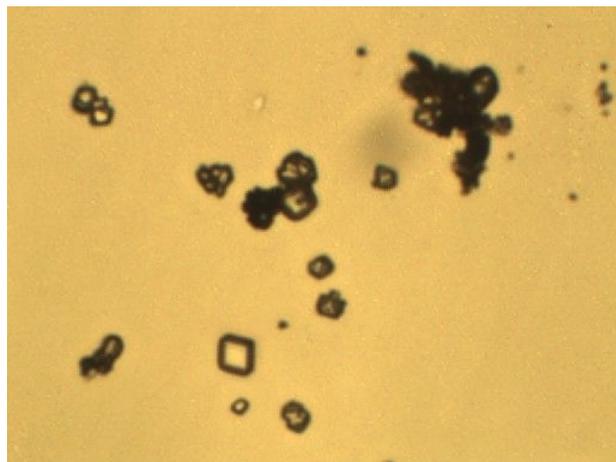
а



б

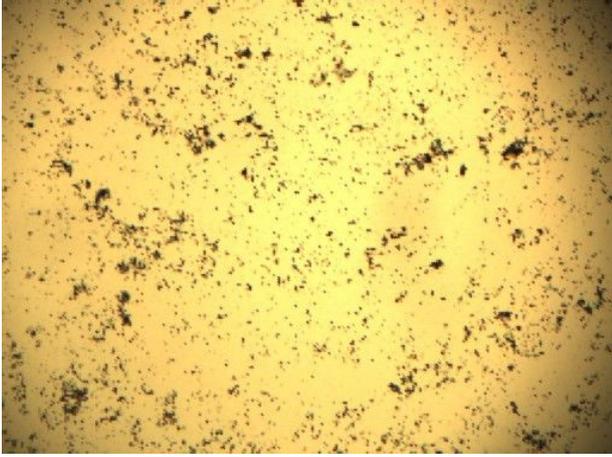


в

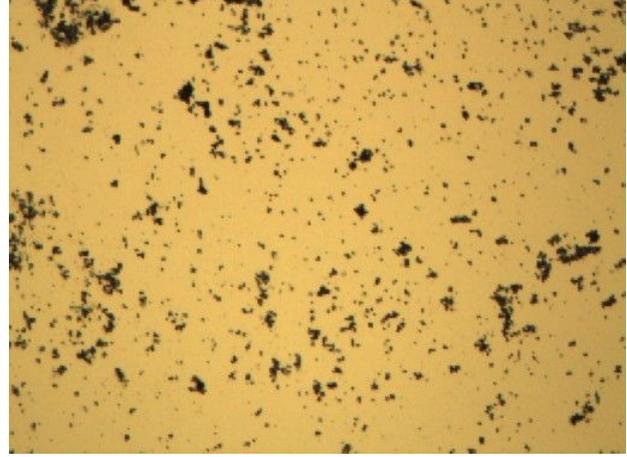


г

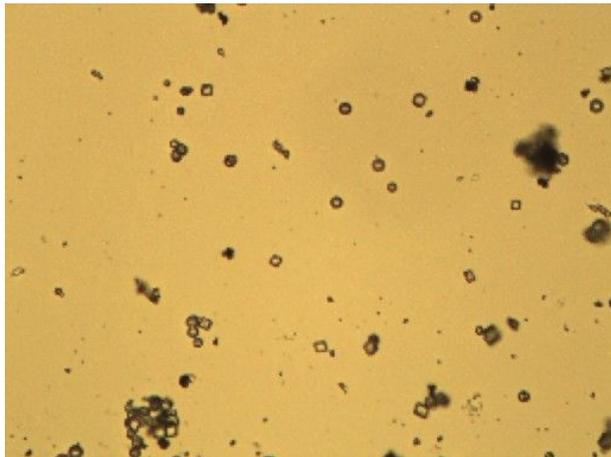
Рисунок 32 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 1: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



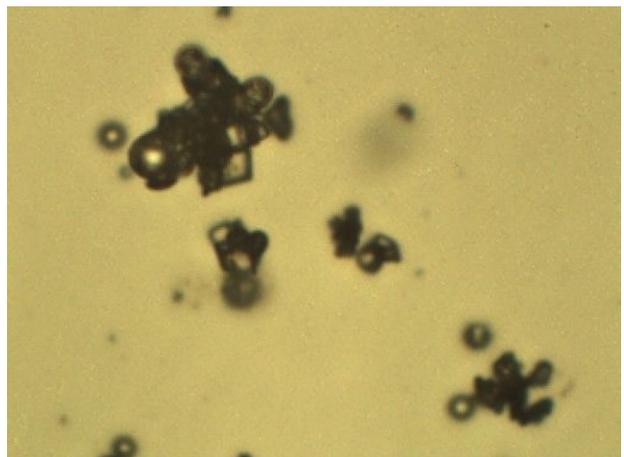
а



б

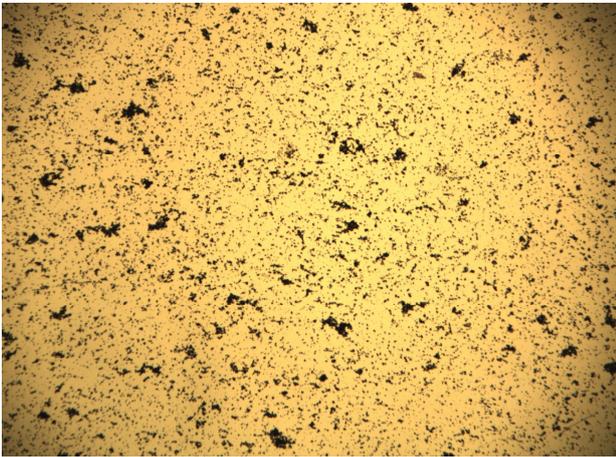


в

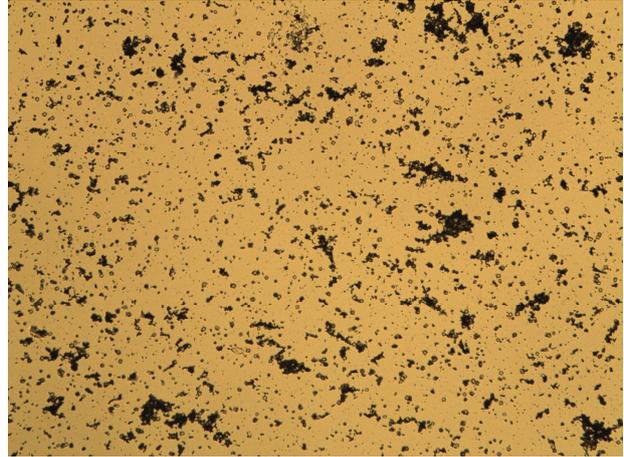


г

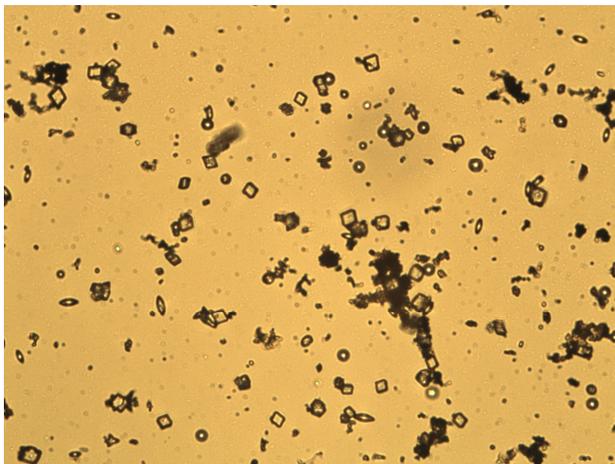
Рисунок 33 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 3: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



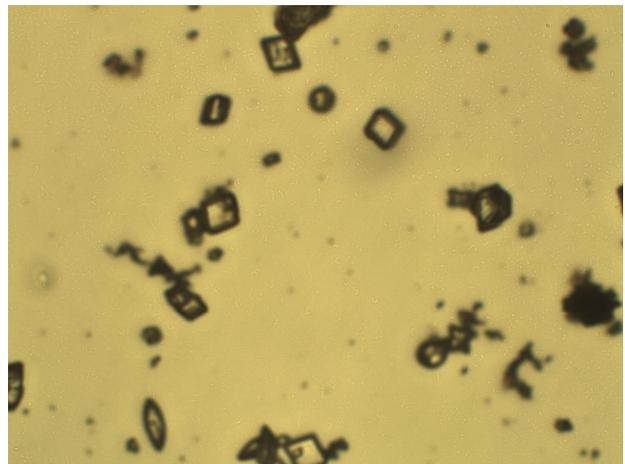
а



б

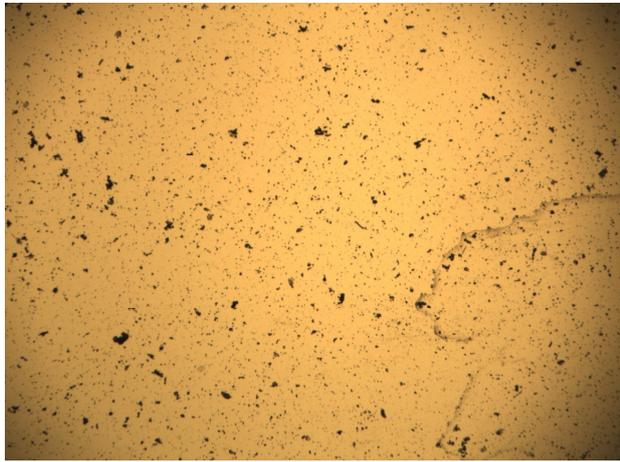


в

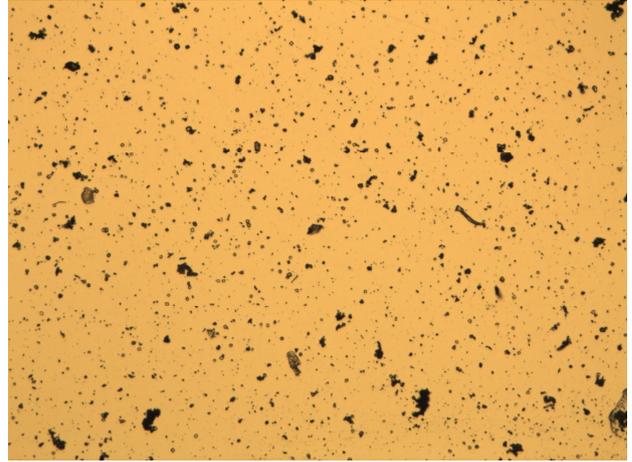


г

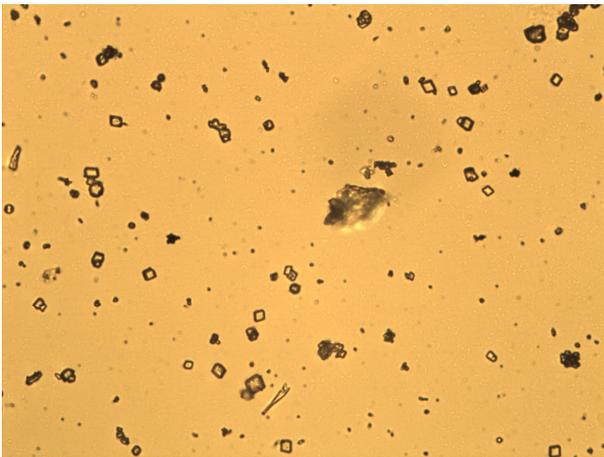
Рисунок 34 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки б: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б

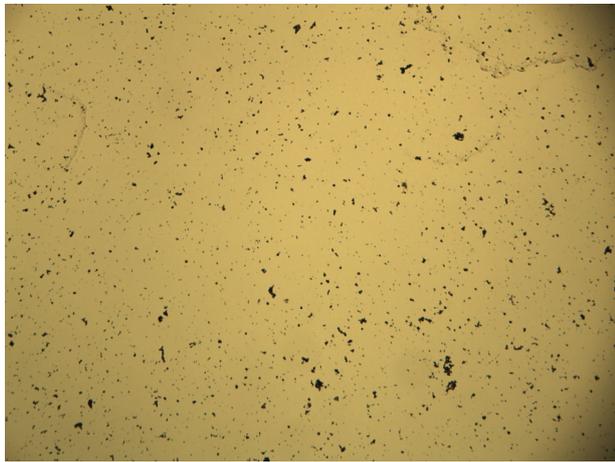


в

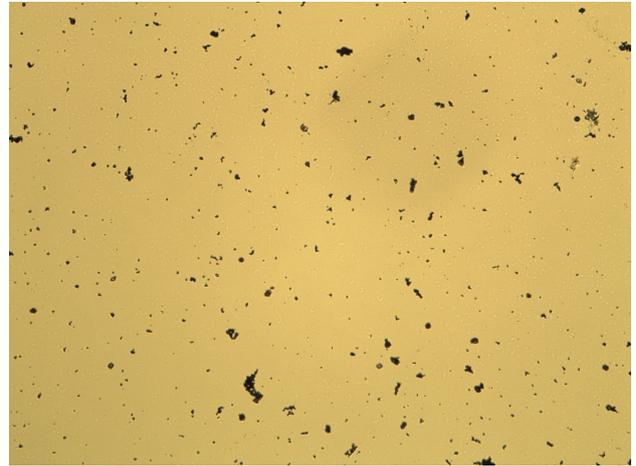


г

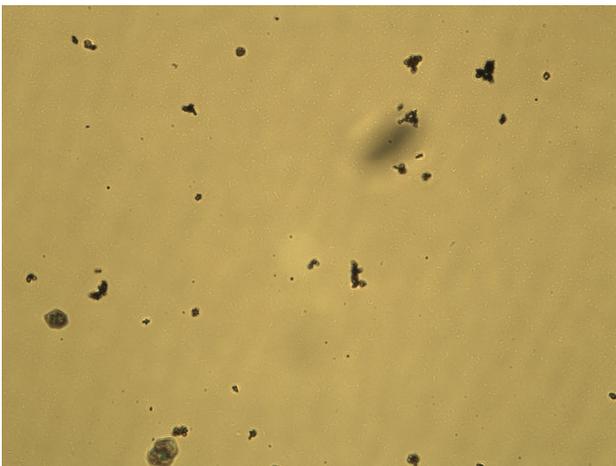
Рисунок 35 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 9: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



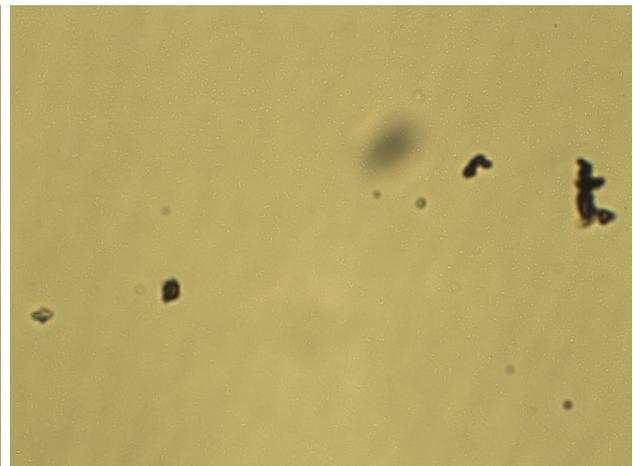
а



б

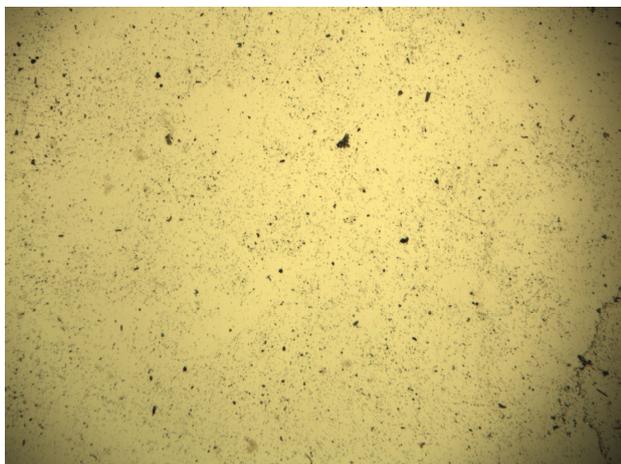


в

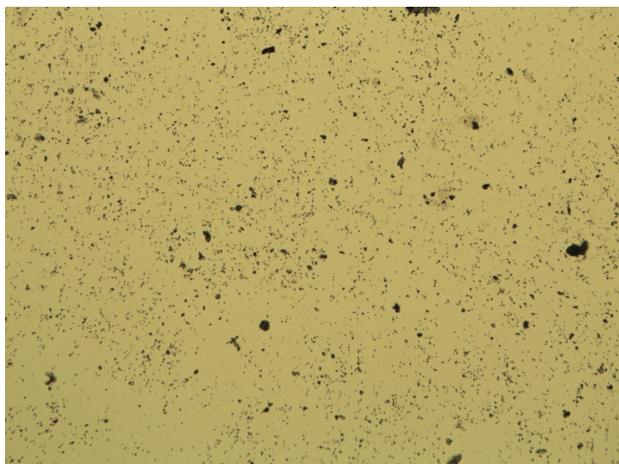


г

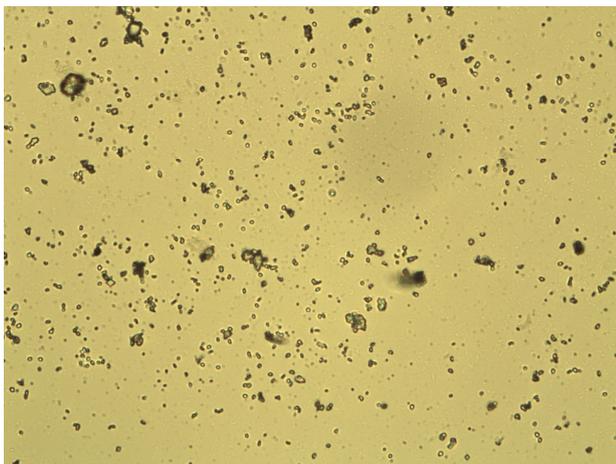
Рисунок 36 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 12: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



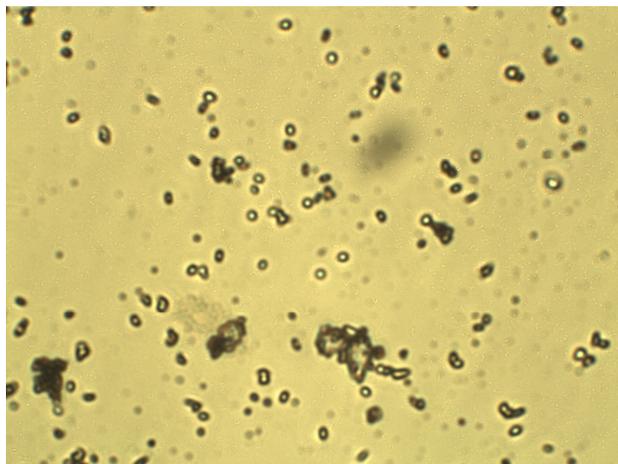
а



б

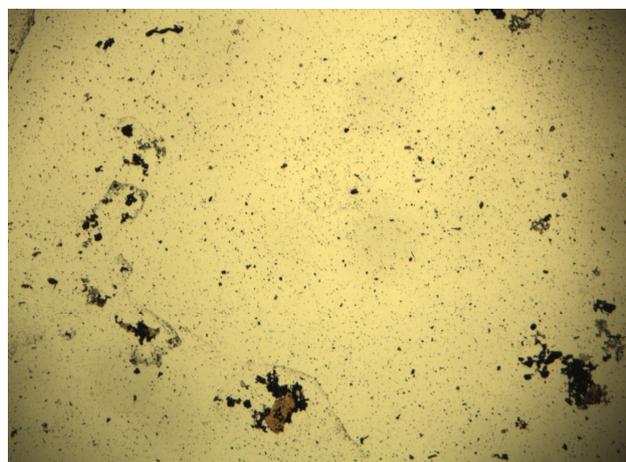


в

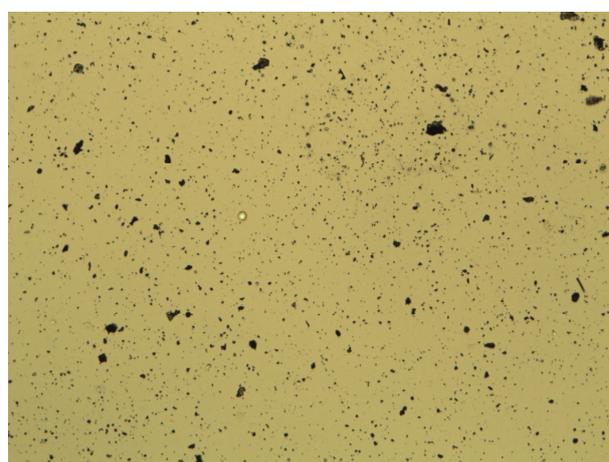


г

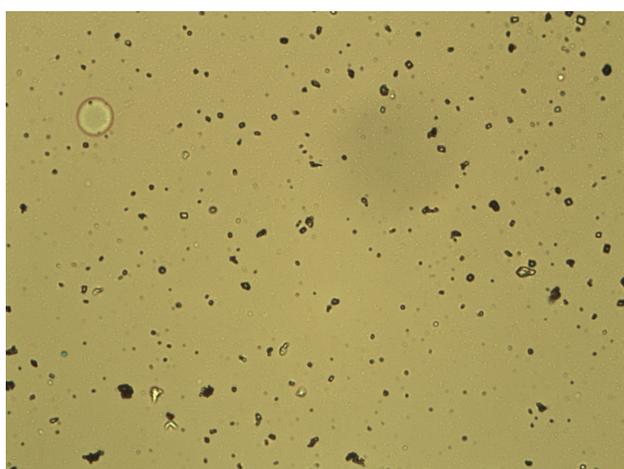
Рисунок 37 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 15: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



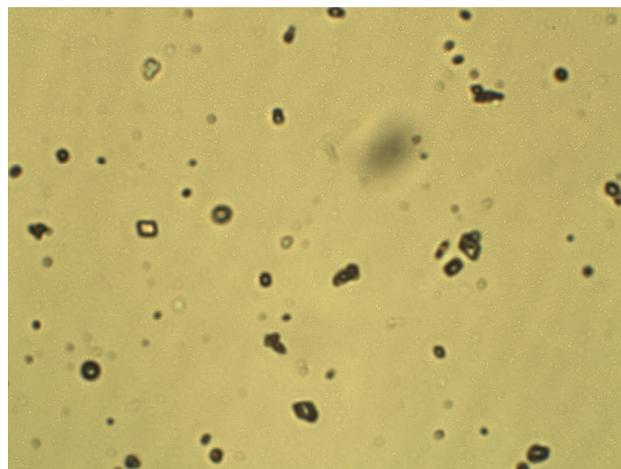
а



б

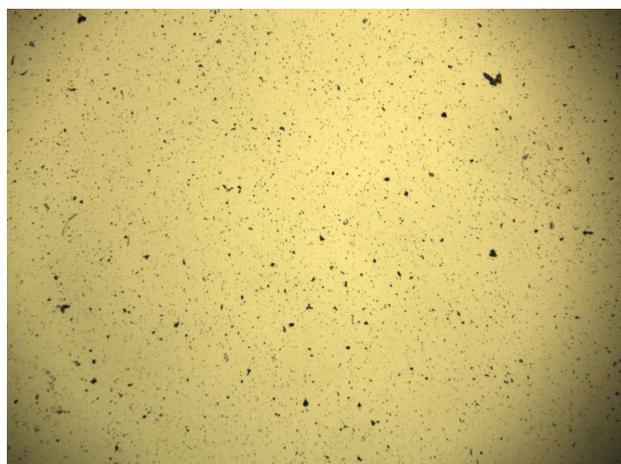


в

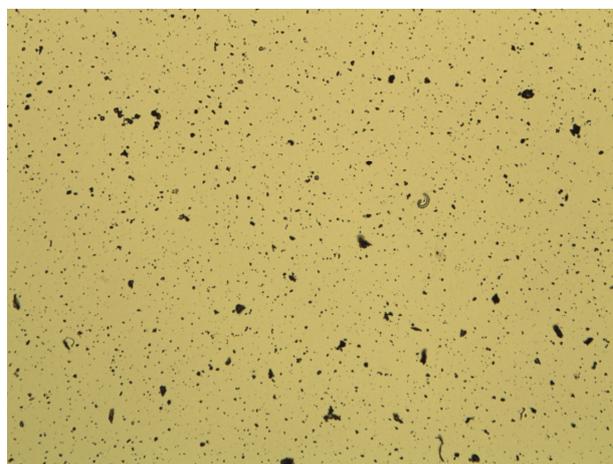


г

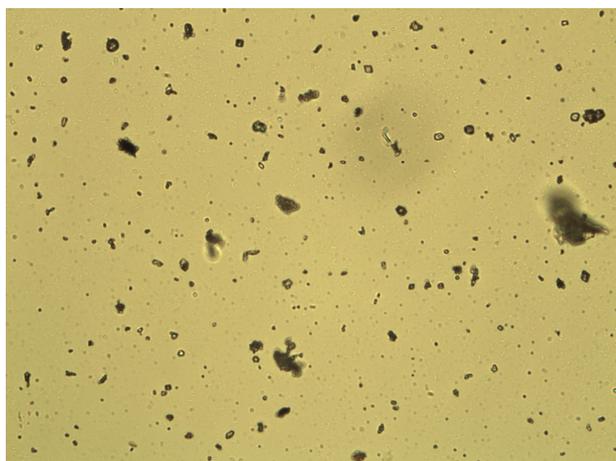
Рисунок 38 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 18: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б

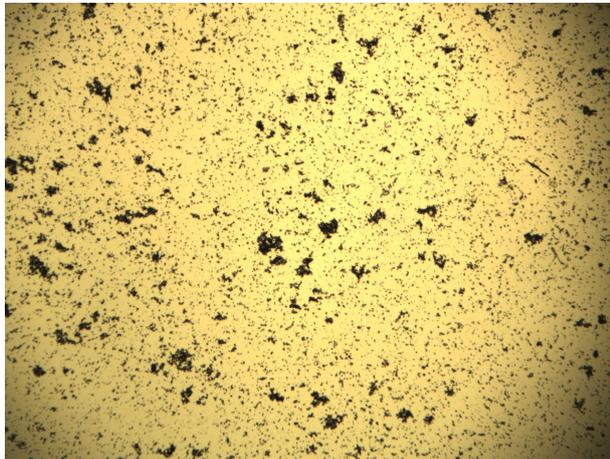


в

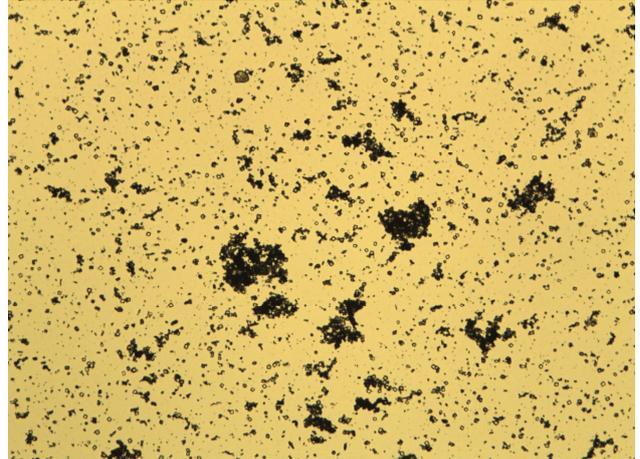


г

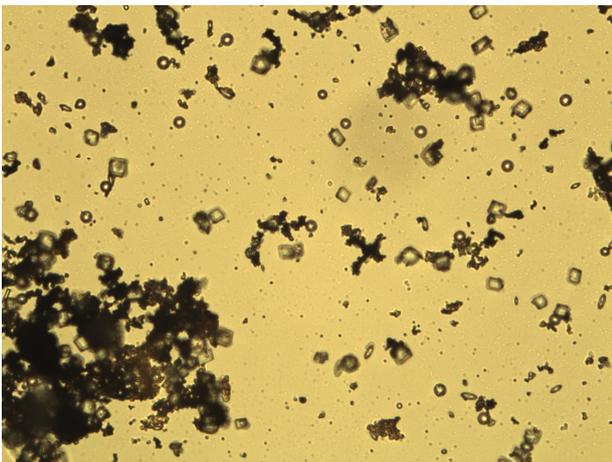
Рисунок 39 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 21: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



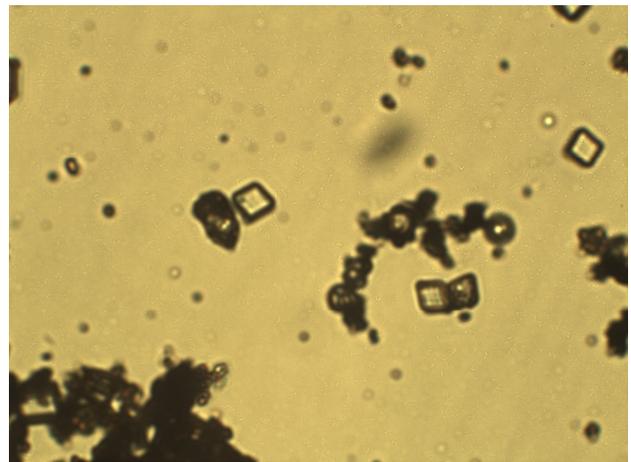
а



б

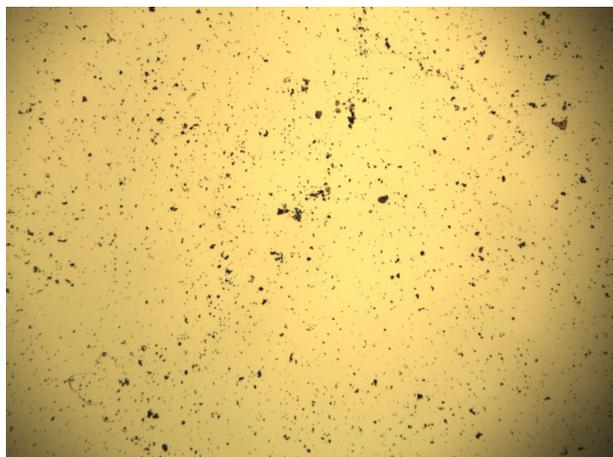


в

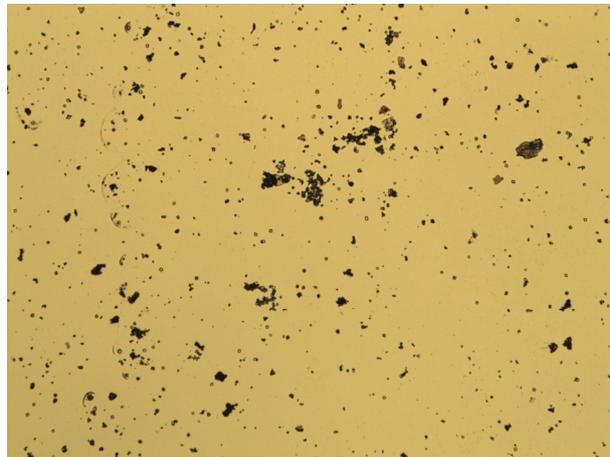


г

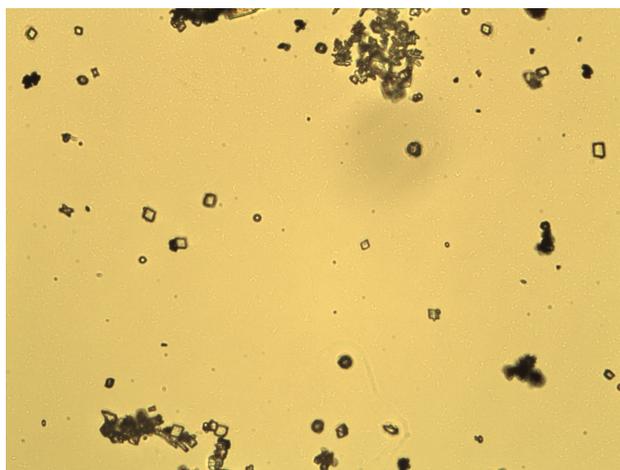
Рисунок 310 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 24: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



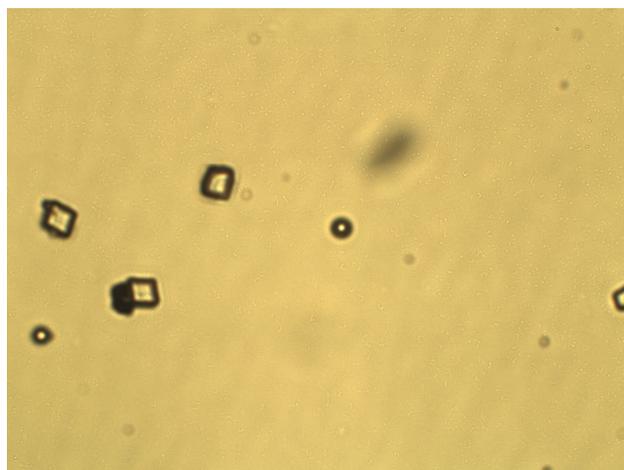
а



б

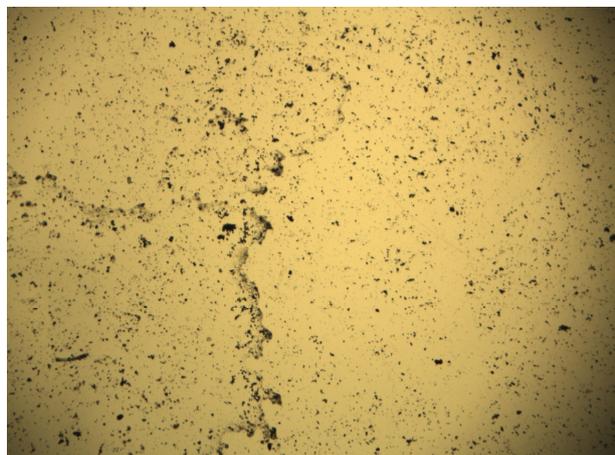


в

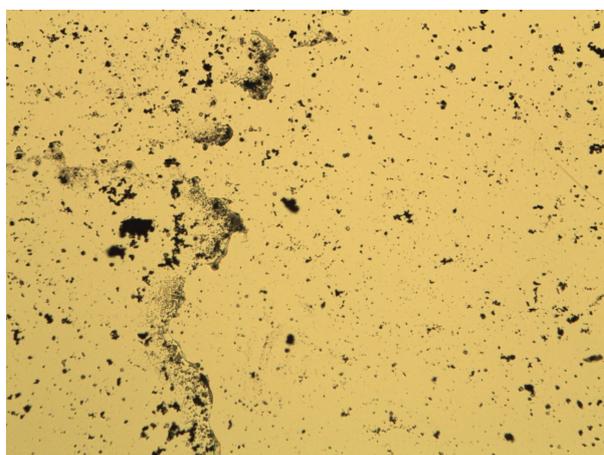


г

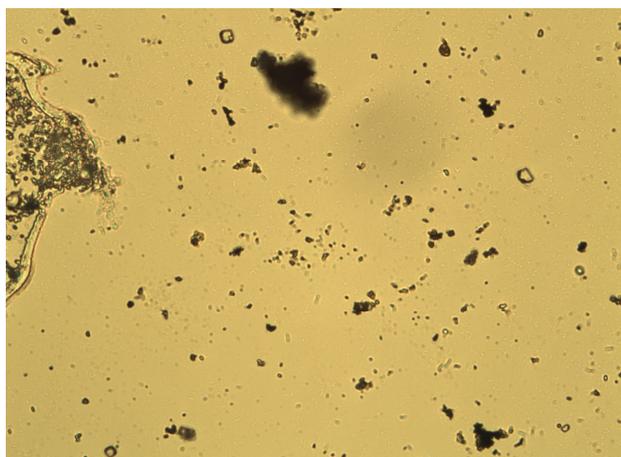
Рисунок 311 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 27: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



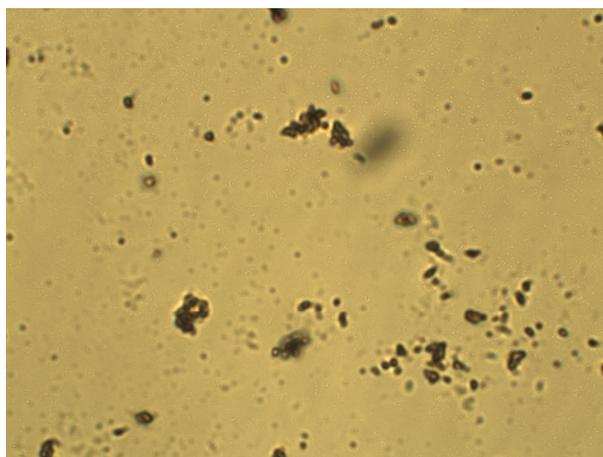
а



б

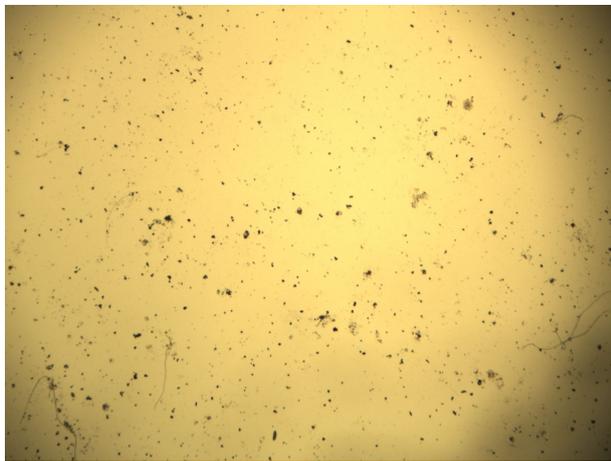


в

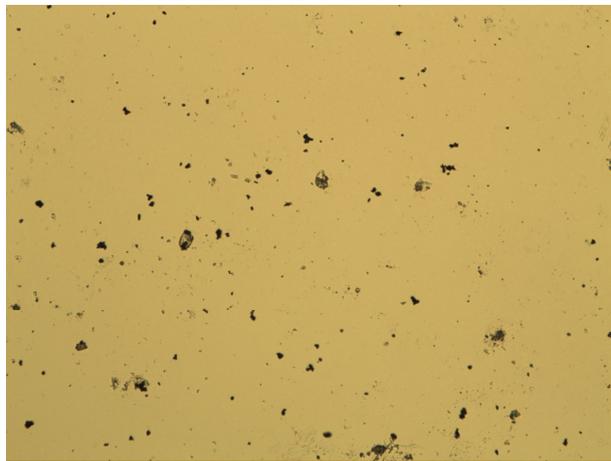


г

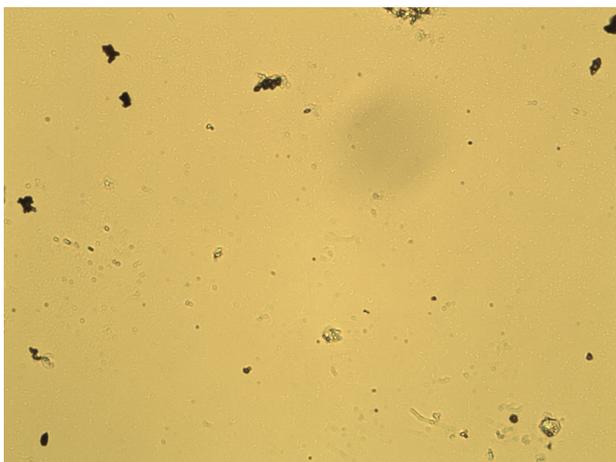
Рисунок 312 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 30: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



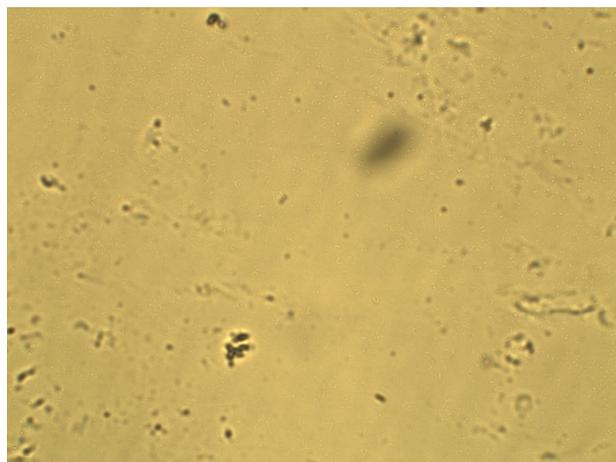
а



б

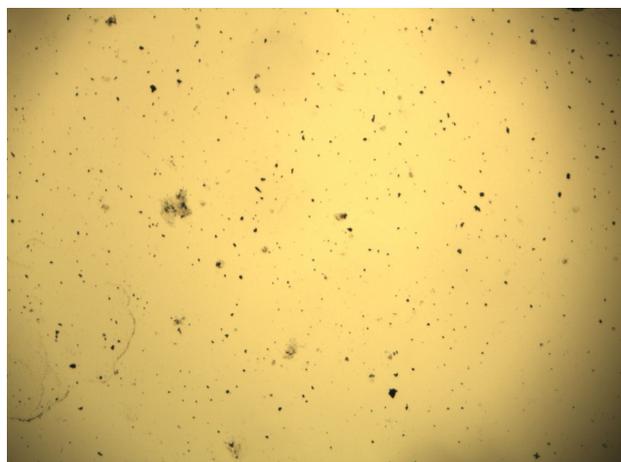


в

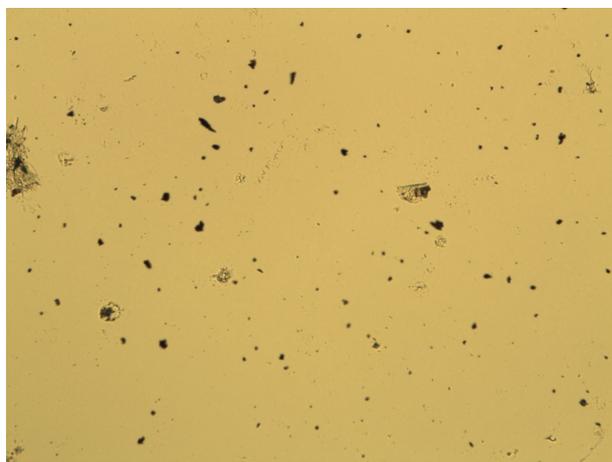


г

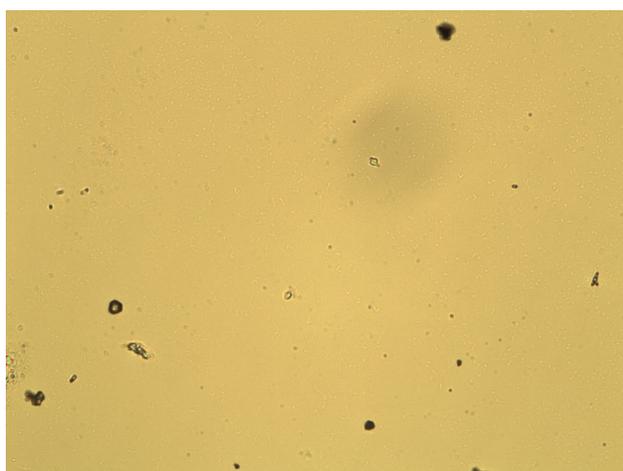
Рисунок 313 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 50: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х



а



б



в



г

Рисунок 314 – Кристаллы соли выпавшей в осадок при прохождении через зону обработки 90: а – увеличение 4х; б – увеличение 10х; в – увеличение 40х; г – увеличение 100х

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boiler scale reduced by magnetic treatment. – “Design and Components in Engineering”, 1965, №8, p.12
2. Diamant R.M.E. Magnetic water treatment/-“J. Fuel and Heat/ Tehnics”, 1969, №16, p.24-26
3. Rippie Charles W. Process and apparatus for magnetic treatment of gaseous oxugen. Патент США, Кл. 204-155, №3186929, опубл. 1/VI 1965
4. А.с. 1000407, Кл. С 02 F 1/48. Магнитный активатор / В. Я. Мягков, П. Г. Дайч, М. И. Пустовойт, О. Т. Крылов. (СССР), – №2996847/23 – 26; заявлено 17.10.80; опубл. 28.02.83. Бюл. №8.
5. А.с. 1000408, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки воды / А. Н. Голубев, П. П. Андреичев, А. С. Петров, Е. В. Авраамов, М. Б. Пороцкий, В. Ф. Погонев, А. Я. Юлис. (СССР), – №3284861/23 – 26; заявлено 20.03.81; опубл. 28.02.83. Бюл. №8.
6. А.с. 1000409, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Н. Т. Кротов, А. Г. Коспевич (СССР), - №3361297/23 – 26; заявлено 10.12.81; опубл. 28.02.83. Бюл. №8.
7. А.с. 1011550, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В. И. Миненко, В. Д. Босенко (СССР), - №3376238/23 – 26
8. А.с. 1020378, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для послойной магнитной обработки жидкости / С. М. Юровский, О. М. Соломанин и др. (СССР), - 3345201/23 – 26; заявлено 01.10.81; опубл. 30.05.83. Бюл. №20.
9. А.с. 1031908, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки водных систем / В. Г. Зерницкий, А. Л. Глузман, Н. Е. Пичугина (СССР), - №3359333/23 – 26; заявлено 03.12.81; опубл. 30.07.83. Бюл. №28.
10. А.с. 1041522, Кл.С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / А. Н. Михальчук, В. Т. Фомичев и др. (СССР), - №2986354/23 – 26; заявлено 25.09.80; опубл. 15.09.83. Бюл. №34.
11. А.с. 1043113, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки водных систем / В. М. Бухолдина, А. Л. Глузман и др. (СССР), - №3375212/23 – 26; заявлено 05.01.82; опубл. 23.09.83. Бюл. №35.
12. А.с. 1058896, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / Н. И. Савчук, А. И. Михальман, П. Н. Мамчак (СССР), - №3257464/23 – 26; заявлено 11.03.81; опубл. 07.12.83. Бюл. №45.
13. А.с. 1096233, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / В. К. Ильин, Ю. А. Конатинский, Г. Г. Кошкин, Л. Я. Сапожников, А. В. Вакуленко. (СССР), - №3522621/23 – 26; заявлено 20.12.82; опубл. 07.06.84. Бюл. №21.
14. А.с. 1105473, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В. М. Бухолдина, В. Г. Зерницкий, В. И. Классен,

Г. Н. Перченко, Н. Е. Пичугина и др. (СССР), - №3551766/23 – 26; заявлено 29.12.82; опубл. 30.07.84. Бюл. №28.

15. А.с. 1114629, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В. З. Кочмарский, В. А. Кривцов. (СССР), - №3569073/23 – 26; заявлено 21.01.83; опубл. 23.09.84. Бюл. №35.

16. А.с. 1130536, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В. М. Бухолдина, В. Г. Зерницкий и др. (СССР), - №3512773/23 – 26; заявлено 19.11.82; опубл. 23.12.84. Бюл. №47.

17. А.с. 1130537, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для обработки воды в магнитном поле / И. Л. Мархасин, Л. А. Демчук, А. Ш. Сыртланов, А. Г. Жданов, Б. М. Лейберг. - №3556289/23 – 26; заявлено 24.02.83; опубл. 23.12.84. Бюл. №47.

18. А.с. 1151229, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / А. И. Мариничев, Ю. С. Запinyaкин, К. А. Марингулов, Л. Л. Плоткин. (СССР), - №3599608/22 – 26; заявлено 03.06.83; опубл. 15.04.85. Бюл. №14.

19. А.с. 1159896, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки воды / И. А. Шугипанов, Н. П. Яковлев, П. Д. Еремеев. (СССР), - №3622519/23 – 26; заявлено 08.04.83; опубл. 07.06.85. Бюл. №21.

20. А.с. 1167154, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / С. С. Душкин, Е. М. Омельченко и др. (СССР), - №3455588/22 – 03; заявлено 18.06.82; опубл. 15.07.85. Бюл. №26.

21. А.с. 1188106, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Н. Т. Кротов (СССР), - №3740713/23 – 26; заявлено 16.05.84; опубл. 30.10.85. Бюл. №40.

22. А.с. 1189812, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат магнитной обработки жидкостей / П. П. Андреичев, С. П. Андреичев, А. М. Воробьев, И. Ф. Голубев, А. С. Петров, В. Е. Иванов, В. В. Никонов. (СССР), - №3733981/23 – 26; заявлено 20.04.84; опубл. 07.11.85. Бюл. №41.

23. А.с. 1212970, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки водных систем / Л. А. Демчук, П. Т. Фойкин, Ф. Я. Габдрахманов, Б. Н. Лейберг. (СССР), - 3740871/23 – 26; заявлено 15.05.84; опубл. 23.02.86. Бюл. №7.

24. А.с. 1212971, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Н. И. Богатырев, Н. И. Катрич, А. В. Лопатченко (СССР), - №3776742/23 – 26; заявлено 31.07.84; опубл. 23.02.86. Бюл. №7.

25. А.с. 1216154, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки газов и жидкостей / И. С. Бройдо, В. М. Бухолдина и др. (СССР), - №3781796/23 – 26; заявлено 20.08.84; опубл. 07.03.86. Бюл. №9.

26. А.с. 123100, Кл. с 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / И. С. Бройдо, В. М. Бухолдина, И. П. Елагина, В. Г. Зерницкий, О. Т. Крылов, В. М. Маев, М. М. Муковоз, Н. Е. Пичугина, Б. В. Рискин,

М. И. Степанов (СССР), - 3790998/23 – 26; заявлено 15.09.84; опубл. 15.05.86. Бюл. №18.

27. А.с. 1263645, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Н. Т. Кротов, А. Г. Косневич и др. (СССР), - №3870144/23 – 26; заявлено 18.03.85; опубл. 15.10.86. Бюл. №38.

28. А.с. 1296513, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / П. В. Жуйко, В. В. Исупова, И. М. Аметов, В. А. Аллахвердян, О. А. Богданов, П. Г. Филлипов, А. Г. Губарев, Г. Я. Мингалимов. (СССР), - 3872306/22 – 26; заявлено 26.03.88; опубл. 15.03.87. Бюл. №10.

29. А.с. 132657, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / А. А. Меламед, Ю. П. Герасимов и др. (СССР), - 3911584/23 – 26; заявлено 17.06.85; опубл. 30.07.87. Бюл. №28.

30. А.с. 1337350, Кл. С 02 F 1/48. Магнитный активатор / И. М. Глущенко, В. Я. Мягков, Ю. В. Мягков, Н. И. Панченко, Н. В. Браун, В. П. Нечаев. (СССР), - 3893249/31 – 26; заявлено 25.04.85; опубл. 15.09.87. Бюл. №34.

31. А.с. 1346583, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки водных систем / Н. Е. Пичугина, В. Г. Зерницкий, О. Т. Крылов, Ю. Г. Вировлянская, В. М. Бухолдина. (СССР), - №3962474/22 – 26; заявлено 09.10.85; опубл. 23.10.87. Бюл. №39.

32. А.с. 1393800, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В.З. Корчмарский, М. Л. Ковалев и др. (СССР), - №4031466/31 – 26; заявлено 26.02.86; опубл. 07.05.88. Бюл. №17.

33. А.с. 1402584, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для обработки воды магнитным полем / В. Г. Макаренков, В. Е. Соленов (СССР), - №4059838/40 – 26; заявлено 28.02.86; опубл. 15.06.88. Бюл. №22.

34. А.с. 1416448, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / А. Ф. Абрамов, В. И. Ивашкин, А. Н. Николенко. (СССР) - №4061912/23 – 26; заявлено 25.04.86; опубл. 15.08.86. Бюл. №30.

35. А.с. 1433908, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В. И. Ткачев, Е. П. Юзик. (СССР), - №4113338/30 – 26; заявлено 27.08.86; опубл. 30.10.88. Бюл. №40.

36. А.с. 1460043, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкотекучих сред / Ю. И. Пашков. (СССР), - №4128982/23 – 26; заявлено 08.10.86; опубл. 23.02.89. Бюл. №7.

37. А.с. 1477689, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / В. Е. Коржаков, В. В. Плежанов (СССР), - №4241214/23 – 26; заявлено 11.05.87; опубл. 07.05.89. Бюл. №17.

38. А.с. 1520017, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки водных систем / В. Г. Зерницкий, В. М. Бухолдина и др. (СССР), - №4283507/23 – 26; заявлено 01.06.87; опубл. 07.11.89. Бюл. №41.

39. А.с. 1527181, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для обработки жидкости в магнитном поле / Б. И. Сыч, А. В. Рыжков, М. Ф. Наумов. (СССР), - №4329627/31 – 26; заявлено 18.11.87; опубл. 07.12.89. Бюл. №45.
40. А.с. 1555284, Кл. С 07 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Н. Ф. Бондаренко, Е. З. Гак, Г. Б. Жевна, К. С. Константинов, И. В. Литвинова, М. М. Махтов, В. А. Пономарева, Э. Е. Рохисон. (ССС), - №4390865/23 – 26; заявлено 01.02.88; опубл. 07.04.90. Бюл. №13.
41. А.с. 1608134, Кл. С 02 F 1/48. Устройство магнитной обработки газообразных и жидких сред / В. А. Радионов, В. М. Ряжских и др. (СССР), - №4319566/23 – 26; заявлено 21.10.87; опубл. 23.11.90. Бюл. №43.
42. А.с. 1668312, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для обработки водных систем магнитным полем / Н. Н. Круглицкий, Б. П. Жанталай и др. (СССР), - №3858197/26; заявлено 22.02.85; опубл. 07.08.91. Бюл. №29.
43. А.с. 1768524, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для обработки воды в магнитном поле / А. И. Михельман, А. А. Ковальковская. (СССР), - №4476983/26; заявлено 12.08.88; опубл. 15.10.92. Бюл. №38.
44. А.с. 1775370. Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкостей / А. Л. Дрояронов, Е. В. Николаенко, Е. П. Смолин. (СССР), - №4767132/26; заявлено 07.12.89; опубл. 15.11.92. Бюл. №42.
45. А.с. 2036163, С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Шулятиков В. И., Шулятиков А. В., Шулятиков И. В., Булгакова С.В. (СССР), - №5025284/26; заявлено 31..01.92; опубл. 27.05.95. Бюл. №15.
46. А.с. 2046761, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Мельников Ю. А., Кудрявцев А. И., Ессин А. Д., Шульман Л. И. (СССР), - №5038770/26; заявлено 20.04.92; опубл. 27.10.95. Бюл. №30.
47. А.с. 2048451, Кл. С 02 F 1/48. Омагничивающее устройство / Клевец Н. И., Гриднев А. И. и др. (РФ), - №4950147/26; заявлено 06.05.91; опубл. 20.11.95. Бюл. №32.
48. А.с. 2049734, Кл. С 02 F 1/48. Узел устройства для магнитной обработки жидкости / Шулятиков В. И., Шулятиков А. В., Шулятиков И. В., Булгакова С. В. (СССР), - №5045613/26; заявлено 03.06.92; опубл. 10.12.95. Бюл. №34.
49. А.с. 802197, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / А. Е. Романов (СССР), - №2658181/23 – 26; заявлено 09.08.78; опубл. 07.02.81. Бюл. №5.
50. А.с. 812741, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / Г. Г. Клещевников (СССР), - №2777716/23 – 26; заявлено 06.06.79; опубл. 15.03.81. Бюл. №10.

51. А.с. 831743, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкостей / В. Н. Лазарев, В. А. Джунь, И. Н. Эриванцев (СССР), - №2744136/23 – 26; заявлено 29.03.79; опубл. 23.05.81. Бюл. №19.
52. А.с. 854890, Кл. С 02 F 1/48. Способ магнитной обработки водных систем / В. Е. Зеленков, Е. П. Смолин, Ю. К. Чернов (СССР), - №2812255/29 – 26; заявлено 24.08.79; опубл. 15.08.81. Бюл. №30.
53. А.с. 857007, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / Р. Г. Головчанская, А. П. Тихонов и др. (СССР), - №270682/23 – 26; заявлено 29.12.78; опубл. 23.08.81. Бюл. №31.
54. А.с. 874656, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидких сред / Ю. А. Кузнецов, Е. В. Михин и др. (СССР), - №2693998/23 – 26; заявлено 12.12.78; опубл. 23.10.81. Бюл. №39.
55. А.с. 899490, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / Г. С. Агафонова, О. Б. Брук и др. (СССР), - №2750858/29 – 26; заявлено 11.04.79; опубл. 23.01.82. Бюл. №3.
56. А.с. 912665, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / В. М. Бухолдина, О. Б. Брук и др. (СССР), - №2949587/29 – 26; заявлено 25.06.80; опубл. 15.03.82. Бюл. №10.
57. А.с. 912666, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки водных систем / В. М. Бухолдина, О. Б. Брук, В. Г. Зерницкий, В. И. Классен, Н. Е. Пичугина. (СССР), - №295990/22 – 26; заявлено 18.07.80; опубл. 15.03.82. Бюл. №10.
58. А.с. 922083, Кл. С 02 F 1/48. Аппарат для магнитной обработки жидкости / В. А. Джунь, В. В. Толстых, В. Н. Лазарев. (СССР), - №2748687/23 – 26; заявлено 09.04.79; опубл. 23.04.82. Бюл. №15.
59. А.с. 929586, Кл. С 02 F 1/48. Способ магнитной обработки жидкости / В. С. Островский, В. А. Нансиков (СССР), - №2941562/23 – 26; заявлено 17.06.80; опубл. 23.05.82. Бюл. №19.
60. А.с. 945081, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для обработки воды в магнитном поле / А. Н. Паньков, Г. М. Богданов, Е. А. Никитин (СССР), - №3237870/23 – 26; заявлено 14.01.81; опубл. 23.07.82. Бюл. №27.
61. А.с. 958324, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / С. С. Душкин, Е. М. Омельченко и др. (СССР), - №3240378/23 – 26; заявлено 02.02.81; опубл. 15.09.82. Бюл. №34.
62. А.с. 966031, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / С. С. Душкин, В. М. Наседкин и др. (СССР), - №2937949/23 – 26; заявлено 27.05.80; опубл. 15.10.82. Бюл. №38.
63. А.с. 981243, Кл. С 02 F 1/48. Магнитная система для устройств магнитной обработки жидкостей / В. В. Башинский, А. Л. Глузман и др. (СССР), - №3303675/23 – 26; заявлено 13.04.81; опубл. 15.12.82. Бюл. №16.

64. А.с. 994481, Кл. С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / А. Л. Глузман, В. Г. Зерницкий, В. И. Классен, Н. Е. Пичугина. (СССР), - №3333311/23 – 26; заявлено 12.08.81; опубл. 07.02.83. Бюл. №5.
65. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию / Серия «Справочники». – Ростов н/д.: Феникс, 2004. – 480с.
66. Антонов С. Н. Исследование влияния длины тонкой стенки на магнитное поле в зоне обработки воды. // Перспектива-2003: Материалы Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: В 8-ми томах. Т. VI.- Нальчик: Каб.- Балк. ун-т., 2003. – С.4-7
67. Антонов С. Н. Математическое моделирование магнитной системы аппарата магнитной обработки воды методом конечных разностей / Энергосберегающие технологии. Проблемы их эффективного использования. Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию образования Волгоградской государственной сельскохозяйственной академии: – Волгоград, ФГОУ ВПО Волгоградская ГСХА, 2009. – С.108-112.
68. Антонов С. Н. Моделирование магнитной системы двухкатушечного аппарата магнитной обработки вещества в программном комплексе El-Cut / Материалы за 8-а международна научна практична конференция, «Образование и наука на XXI век», – 2012. Том 47. Технологии. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД – 80с.
69. Антонов С. Н. Определение эффективности обработки воды магнитным полем / Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве: сб. научн. тр./ Ст.ГАУ. – Ставрополь, 2008. – С.317-320.
70. Антонов С. Н. Оптимизация магнитной системы аппарата магнитной обработки воды Materiali VII Miedzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI wieka – 2011» Volume 21. Techniczne nauki.: Przemysl. Nauka I studia – 112str.
71. Антонов С. Н. Опыт моделирования магнитных систем с использованием САПР / Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК: материалы III Российской науч. – практ. конф. (Ставрополь, 20-22 апреля 2005 г.) / Ст.ГАУ. – Ставрополь, 2005. – С.41-43.
72. Антонов С. Н., Атанов Г. В. Расчет магнитных систем с помощью программы ElCut / Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК: материалы V Российской науч. – практ. конф. Ставрополь, / Ст.ГАУ. – Ставрополь, 2009. – С.11-14.
73. Антонов С. Н., Атанов И. В. Разработка стенда по определению эффективности магнитной обработки воды / Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: сборник научных трудов по мате-

риалам 74-й научно-практической конференции СтГАУ. – Ставрополь: АГРУС, 2010. – С.13-15

74. Антонов С. Н., Атанов И. В. Эффективность магнитной обработки воды для систем теплоснабжения / Механизация и электрификация с.-х. – 2011.-№9. – С.15-16.

75. Антонов С. Н., Ивашина А. В. Аппарат магнитной обработки воды / Механизация и электрификация с.-х. – 2009.-№8. – С.31-32.

76. Антонов С. Н., Никитенко Г. В., Атанов И. В., Лысаков А. А., Симикин А. Н. Аппарат магнитной обработки вещества / Патент на полезную модель №97996 РФ, МПК⁸ C02F 1/48.-№2010115650/05; Заявлено 21.04.2010; Опубл. 27.09.2010 Бюл.№27; Приоритет 21.04.2010. – 3с.

77. Антонов С. Н., Шарипов И. К., Шемякин В. Н., Адошев А. И. Моделирование магнитных систем с использованием систем автоматизированного проектирования / Достижения науки и техники АПК – 2010.-№10. – С.75-78.

78. Антонов С. Н. Классификация аппаратов магнитной обработки воды / Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве: сб. научн. тр. / Ст.ГАУ. – Ставрополь, 2008. – С.320-324.

79. Асатурян В. И. Теория планирования эксперимента: учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 248с.

80. Атанов И. В., Антонов С. Н. Расчет магнитных полей аппарата магнитной обработки вещества с использованием программного комплекса Elcut. // Сб. научн. тр.: Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК. – СтГАУ, 2003. – С.587-590

81. Ахмеров У. Ш. и др. Методы индикации “магнитной воды”. – Казань: изд-во Казан. ун-та, 1972. – 74с.

82. Ашмарин И. П. и др. Быстрые методы статистической обработки и планирования экспериментов. – Л.:Ленингр. ин-т, 1974. – 76с.

83. Белан Ф. И. Водоподготовка: (расчеты, примеры, задачи) – М.: Энергия, 1980. – 256с.

84. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Превод с англ. И. И. Талалова, – М.: Энергия, 1970. – 376с.

85. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Олег Болеславович Буль. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336с.

86. Вдовенко М. И. и др. Загрязнение и износ поверхностей нагрева парогенераторов / М. И. Вдовенко, А. Я. Баяхунов, Е. Я. Чурсина. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 133с.

87. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – М.: Колос, 1973. – 199с.

88. Внутритрубные образования в паровых котлах сверхкритического давления / В. П. Глебов, Н. Ю. Эских, В. М. Трубачев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 239с.
89. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192с.
90. Гаврилов А. Ф., Малкин Б. Н. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок, – М.: Энергия, 1980. – 328с.
91. Голубцов В. А. и др. Удаление шлама при обработке воды магнитным полем в промышленной энергетике – М.: 1967. – 13с.
92. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288с.
93. Громогласов А. А. и др. Водоподготовка: процессы и аппараты – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 271с.
94. Гуревич Э. И., Рыбин Ю. Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216с.
95. Гурницкий В. Н., Никитенко Г. В., Атанов И. В., Антонов С. Н. Влияние геометрии магнитной системы на интенсивность обработки вещества в электромагнитном поле. // Сб. научн. тр.: Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в с.-х. – СГСХА, 2000. – С.170.
96. Гурницкий В. Н., Никитенко Г. В., Атанов И. В., Антонов С. Н. Влияние магнитного поля на жесткость воды. // Сб. научн. тр.: Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК. – СГСХА, 2001г. – С.268
97. Гурницкий В. Н., Никитенко Г. В., Атанов И. В., Антонов С. Н. Итоги исследования аппарата магнитной обработки воды за 2001г. // Сб. научн. тр.: Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в с.-х. – СГСХА, 2002. – С.73
98. Гурницкий В. Н., Никитенко Г. В., Атанов И. В., Антонов С. Н. Магнитом по воде. // Изобретатель и рационализатор. – М., 2001. – С.12
99. Гурницкий В. Н., Никитенко Г. В., Атанов И. В., Антонов С. Н. Определение эффективности магнитной обработки воды при питании намагничивающей катушки аппарата от источников однополупериодного выпрямления. // Сб. научн. тр.: Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК. – СГСХА, 2001. – С.59
100. Драганов Б. Х. и др. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463с.
101. Духанин В. С. Исследование влияния магнитного поля на гидратацию ионов в растворах электролитов и на скорость некоторых химических реакций. – Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. хим. наук.-М.: 1973. – 23с.

102. Душкин С. С. Улучшение технологии очистки природных и сточных вод магнитным полем. – Харьковский гос. ун-т.: 1988. – 146с.
103. Душкин С. С., Евстратов В. Н. Магнитная водоподготовка на хим. предприятиях. – М.: Химия, 1986. – 143с.
104. Зыков А. К. Паровые и водогрейные котлы: Справочн. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 124с.
105. Классен В. И. Вода и магнит. – М.: Наука, 1973. – 111с.
106. Красюк Н. П., Дымович Н. Д. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1974. – 536с.
107. Кузьменко А. Г., Грачев В. Г., Солодовник Ф. С. Электромагнитные механизмы металлургических машин. – М. Металлургия, 1996. – 508с.
108. Кульский Л. А., Душкин С. С. Магнитное поле и процессы водообработки. – Киев.: Наука, 1988. – 110с.
109. Кущенко А. Д., Богуславский Л. И. Поверхностное натяжение и электропроводность так называемой магнитной воды. – «Электрохимия», 1967. т3, вып.1, – С.123-130.
110. Лавров Н. А. Электромагнитная обработка воды. – М.: БТИ легкой пром-ти, 1967. – 32с.
111. Литвинов Я. Н. Предотвращение и удаление накипи в двигателях и котлах кормозапарников. – Минск: Госиздат БССР, 1960. – 59с.
112. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок малой мощности. – М.: Энергия, 1969. – 144с.
113. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул [учебн. пособие для вузов] – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1988. – 238с.
114. Маневич Ш. С. Простейшие статистические методы анализа результатов наблюдений и планирования экспериментов. – Казань, 1970. – 106с.
115. Мельников С. В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин.- 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980. – 168с.
116. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: 1977. – 65с.
117. Мещерский Н. А. Эксплуатация водоподготовительных установок электростанций высокого давления. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 408с.
118. Миллер Э. В., Классен В. И., Кущенко А. Д. О влиянии магнитного поля на вязкость воды. - Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. – М.: Цветметинформация, 1971. – С.59-62.
119. Миненко В. И. Магнитная обработка водно-дисперсионных систем. – Киев.: 1970. – 167с.

120. Миненко В. И. Электромагнитная обработка воды в теплоэнергетике.: Вопросы теории и практики. – Харьков: Высш. шк. 1981. – 97с. 102
121. Никитенко А. Г. и др. Программирование и применение ЭВМ. – М.: Высш. шк., 1990. – 231с.
122. Никитин С. А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 248с.
123. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989. – 544с.
124. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 558с.
125. Проектирование магнитных систем электротехнических устройств Учебное пособие по дисциплине «Проектирование систем электрификации» / С. Н. Антонов, Д. Е. Кофанов; ФГОУ ВПО СтГАУ. – Ставрополь: АГРУС, 2011. – 240с.
126. Ремпель С. И., Бураков М. Р. О механизме явлений при магнитной и высокочастотной водоподготовке. – Водоснабжение №4. выпуск 30. – М., 1964. – 187с.
127. Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. – М.: Наука, 1971. – 192с.
128. Рязанов Г. А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. – М.: Наука, 1966. – 191с.
129. Связь между чистотой котла и питательной водой / перевод А. Я. Антонова под ред. Ю. Н. Кострикина. – М.: 1962. – 23с.
130. Сипайлов Г. А. и др. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высш. шк., 1989. – 239с.
131. Справочник по теплоснабжению сельскохозяйственных предприятий / В. В. Жабо, Д. П. Лебедев, В. П. Мороз и др.; Под ред. В. В. Уварова. – М.: Колос, 1983. – 320с.
132. Старик Д. Е. Как рассчитать эффективность инвестиций. – М.: ФинстатИнформ, 1996. – 93с
133. Стерман Л. С., Покровский В. Н. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС. – М.: Энергия, 1981. – 232с.
134. Стукалов П. С. и др. Магнитная обработка воды. – Л.: Судостроение, 1969. – 192с.
135. Тебенихин Е. Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 142с.
136. Тебенихин Е. Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках – М.: Энергия, 1977. – 183с.
137. Тебенихин Е. Ф., Гусев Б. Т. Обработка воды магнитным полем в теплоэнергетике. / под ред. чл.-корр. АН СССР В.А. Голубцова. – М.: Энергия, 1970. – 144с.

138. Тепло- и водоснабжение сельского хозяйства / С. П. Рудобашта, Н. И. Барановский, Б. Х. Драганов и др.; Под ред. С. П. Рудобашты. – М.: Колос, 1997. – 509с.

139. Тихонов А. Н., Уфимцев Н. В. Статистическая обработка результатов экспериментов.: Учебн. пособие – М.: Моск. ин-т, 1988. – 174с.

140. Трофимова Т. И. Курс физики: Учебн. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 7-е изд. – М.: Высш. шк., 2003. – 542с.

141. Уманский Д. М. Способ контроля эффективности магнитной обработки технической воды. – «Промышленная энергетика», 1968, №8, – С.30-32.

142. Федоров Н. Н. Основы электродинамики. – М.: «Высшая школа», 1980. – 399с.

143. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256с.

144. Фисенко В. Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 44с.

145. Формалев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 400с.

146. Чернов А. А. Физика кристаллизации. – М.: Знание, 1983. – 64с.

147. Шапоров Н. Ф. Водоподготовка для промышленных и отопительных котельных. – М.: Стройиздат, 1976. – 112с.

148. Щелоков Я. М. и др. Очистка поверхностей нагрева котлов утилизаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 159с.

149. Щуп Т. Е. Прикладные численные методы в физике и технике / Пер. с англ.; Под ред. С.П. Меркурьева. – М.: Высш. шк., 1990. – 255с.

150. Юдаев Б. Н. Теплоотдача. – М.: Высш. шк., 1981. – 320с.

Internet ресурсы:

www.wikipedia.org

www.twirpx.com

www.rosinmn.ru

www.imlab.narod.ru

www.elcut.ru

www.ansys.msk.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ВОДОПОДГОТОВКА В КОТЕЛЬНЫХ	4
1.1 Способы водоподготовки в котельных	4
1.2 Процесс воздействия магнитного поля на воду	10
1.3 Технологические схемы водоподготовки	13
1.4 Аппараты магнитной обработки воды	18
1.4.1 Аппараты магнитной обработки воды с постоянными магнитами	19
1.4.2 Аппараты магнитной обработки воды с электромагнитами.....	31
1.4.3 Анализ перспектив проектирования аппаратов магнитной обработки воды	42
2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ АППАРАТА МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ	45
2.1 Теория электромагнитного поля	45
2.1.1 Электромагнитное поле как форма существования материи	45
2.1.2 Основные характеристики электромагнитного поля	46
2.1.3 Электромагнитные параметры и классификация сред.....	51
2.1.4 Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах	53
2.1.5 Уравнения Максвелла в комплексной форме	59
2.1.6 Классификация сред по проводимости	61
2.1.7 Классификация электромагнитных полей	62
2.2 Цепной метод	64
2.2.1 Основные допущения, принимаемые при расчете магнитных цепей.....	64
2.2.2 Расчет неразветвленных магнитных цепей.....	65
2.2.3 Расчет разветвленных магнитных цепей	69
2.3 Метод конечных разностей	72
2.3.1 Релаксационный метод	79
2.3.2 Итерационный метод.....	81
2.3.3 Граничные условия для градиента	83
2.3.4 Границы, совпадающие с узлами сетки	83
2.3.5 Границы, не совпадающие с узлами сетки	88
2.4 Метод конечных элементов	92
2.5 Метод интегральных уравнений	94
3 РАЗРАБОТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АМОВ	95
3.1 Однокатушечный АМОВ	95
3.2 Двухкатушечный АМОВ	97

3.3 Использование программного комплекса ELCUT при расчете магнитных систем	100
3.3.1 Общие сведения.....	100
3.3.2 Создание геометрического объекта.....	106
3.3.3 Задание свойств объекта и решение задачи.....	112
3.3.4 Анализ полученных данных	118
3.4 Оптимизационные исследования магнитной системы однокатушечного АМОВ	134
3.4 Оптимизационные исследования магнитной системы двухкатушечного АМОВ	140
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АМОВ	144
4.1 Способы и методы определения эффективности магнитной обработки воды	144
4.1.1 Методы контроля основанные на косвенных показателях	144
4.1.2 Методы контроля основанные на учете количества выделившейся твердой фазы	149
4.2 Исследование влияния АМОВ на процесс накипеобразования	155
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Провод марки ПСД	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Провода марок МГВ, МГВЭ, МГВСЛ, МГВСЛЭ	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Провода прямоугольного сечения	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Результаты расчета однокатушечного АМОВ	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Результаты расчета двухкатушечного АМОВ	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Результаты экспериментальных исследований однокатушечного АМОВ	178
ПРИЛОЖЕНИЕ З – Результаты экспериментальных исследований двухкатушечного АМОВ	192
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	206

Научное издание

Антонов Сергей Николаевич
Адошев Андрей Иванович
Шарипов Ильдар Курбангалиевич
Шемякин Виталий Николаевич

**АППАРАТЫ МАГНИТНОЙ
ОБРАБОТКИ ВОДЫ.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ИССЛЕДОВАНИЕ**

Монография

